



Elisabete Maria Salgado Raposo

Licenciada em Engenharia Geológica

Observação de deslocamentos em obras geotécnicas

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Geológica (Geotecnia)

Orientador: António da Silva Gomes, Investigador
coordenador aposentado, LNEC

Co-orientador: Ana Paula Silva, Professora auxiliar,
FCT/UNL

Juri

Presidente: Doutor Pedro Calé da Cunha Lamas, Prof. Auxiliar – FCT/UNL

Arguente: Doutor João Manuel Marcelino Mateus da Silva, Inv. Principal LNEC

Vogais: Doutor António Fernando da Silva Gomes, Inv. Coordenador LNEC (aposentado)
Doutora Ana Paula Fernandes da Silva, Prof. Auxiliar – FCT/UNL



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro 2011

Observação de deslocamentos em obras geotécnicas

Copyright@Elisabete Maria Salgado Raposo, 2011

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou em forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

A realização desta dissertação foi o culminar de vários objectivos académicos traçados e representa inúmeras horas de estudo e de esforço e que não seria possível sem a ajuda de diversas pessoas, a quem expresso os meus sinceros agradecimentos:

- Ao Professor António da Silva Gomes pela amizade, orientação e revisão crítica deste trabalho. Um agradecimento especial por toda a motivação e por todos os conhecimentos transmitidos ao longo deste trabalho;
- À Professora Ana Paula da Silva pela amizade e incentivo prestado ao longo de todo o meu percurso académico;
- Ao Engenheiro Toco Emílio pela simpatia, disponibilidade e bibliografia;
- À Engenheira Maria João Henriques pela amizade e por todos os esclarecimentos prestados, simpatia e disponibilidade;
- Ao Engenheiro Berberan pela disponibilidade, simpatia e apoio bibliográfico;
- Aos “Primos Zéis” : Ana Maria Ribeiro, Daniel Rodrigues, Ricardo Ramos, Catarina Gusmão, Paulo Meira pela amizade ao longo deste percurso nem sempre fácil;
- À minha amiga Rute Gomes pelo apoio, companhia, pela bibliografia e por todas as críticas construtivas, que de alguma maneira ajudaram na realização deste trabalho;
- Um especial agradecimento à minha amiga Catarina Pedroso que desde o primeiro dia de faculdade esteve sempre ao meu lado e foi o meu apoio nas horas mais difíceis;
- Aos meus pais José e Teresa, por todos os sacrifícios que fizeram por mim. Sempre foram e serão a minha maior força e inspiração e sem o vosso apoio não teria conseguido. À minha irmã Sandra e aos meus sobrinhos Beatriz e Martim, por serem a minha alegria e conseguirem sempre fazer-me sorrir;
- E um agradecimento muito especial ao Alexandre pelo Amor, apoio e pela motivação. Sem ti e sem o teu incentivo não tinha conseguido.

A todos o meu profundo e sentido agradecimento.

Resumo

A observação de obras geotécnicas tem assumido uma importância crescente, nomeadamente devido, quer à ocorrência de incidentes e de acidentes, alguns com consequências catastróficas do ponto de vista de perda de vidas humanas e de prejuízos materiais e ambientais, quer devido à necessidade de calibrar os modelos de comportamento. Um tipo de obras onde essa observação é essencial refere-se às que utilizam o espaço subterrâneo especialmente em meios urbanos, em regra caracterizado pela heterogeneidade dos terrenos atravessados, em função da crescente falta de espaço à superfície.

De entre as grandezas objecto de observação em obras geotécnicas, a medição dos deslocamentos superficiais e internos assumem destaque particular.

A presente dissertação, para além de enunciar, de forma sintética, os principais objectivos da observação de obras geotécnicas, descreve os principais métodos e equipamentos utilizados na observação dos deslocamentos superficiais e internos.

No caso dos deslocamentos superficiais são referidos os métodos topográficos e geodésicos. No que se refere à medição dos deslocamentos internos, descrevem-se dispositivos do tipo inclinómetros, extensómetros, INCREX, convergenciómetros, assentímetros, fibras ópticas e fios-de-prumo.

Apresentam-se ainda alguns exemplos da aplicação dos métodos supracitados a obras realizadas em Portugal, mas também em obras realizadas noutros países. A dissertação inclui um capítulo sobre a utilização dos diversos métodos nas diferentes obras geotécnicas: barragens, túneis, muros, taludes, bem como a utilização dos sistemas de observação para monitorizar movimentos de terrenos. Faz ainda referência às perspectivas sobre a contribuição da observação de obras geotécnicas no desenvolvimento da geotecnia.

Palavras-chave: Obras geotécnicas, deslocamentos superficiais, deslocamentos internos, metodologias de observação, equipamentos de observação.

Abstract

The observation of geotechnical works has assumed increasing importance, particularly due to the occurrence of incidents and accidents, some with catastrophic consequences in terms of loss of human lives, material and environmental damage, either due to the need to calibrate the behavior models. A type of works where this observation is essential refers to those using the underground space specially in urban areas, usually characterized by the large heterogeneity of the massifs crossed, given the growing lack of space on the surface.

Among the physical quantities to be monitored in geotechnical works, the measurement of surface and internal displacements takes particular relevance.

This master thesis, in addition to state, in a specific way, the main purposes of the observation of geotechnical works, describes the methods and equipments used in the observation of surface and internal displacements.

Regarding surface displacements are referred to the topographic and geodetic methods. Several devices types like inclinometers, strain gauges, INCREX, convergence meters, settlement cells, fiber optics sensors and plumb lines are also describe.

We present also examples of the application of these methods works carried out in Portugal but also in works carried out in other countries. The master thesis includes a chapter on the use of several different methods in geotechnical works: dams, tunnels, walls, slopes, and the use of observation systems to monitor landslides. Reference is also made to the perspectives on the contribution of observation in the development of geotechnics.

Keywords: Geotechnical works, measurement of surface displacements, internal displacement, observation methodologies, observation equipment.

Índice de matérias

Agradecimentos.....	III
Resumo	V
Abstract	VII
Índice	IX
Índice de figuras	XI
Índice de tabelas	XIII
Abreviaturas	XV
1. Introdução.....	1
1.1. Os sistemas de observação	3
2. Objectivos da observação em obras geotécnicas.....	7
2.1. Importância do método observacional	12
2.2. Inspeções visuais	15
3. Metodologias de medição de deslocamentos superficiais	17
3.1. Métodos topográficos e geodésicos.....	17
3.1.1. Generalidades	17
3.1.2. Triangulação.....	25
3.1.3. Trilateração.....	25
3.1.4. Poligonação.....	25
3.1.5. Nivelamento.....	26
3.2. Equipamentos de observação.....	26
3.2.1. Teodolitos	26
3.2.2. Distanciómetro Electromagnético (DEM)	27
3.2.3. Taqueómetro	28
3.2.4. Nível óptico.....	31
3.3. GNSS (Global Navigation Satellite System)	31
3.4. Varrimento laser	37
3.5. Fotogrametria	41
4. Metodologias de medição de deslocamentos internos	43
4.1. Generalidades	43
4.2. Inclínómetros	46
4.3. INCRemental Extensometer (INCRES).....	57
4.4. Assentímetros.....	64
4.5. Extensómetros.....	66
4.5.1. Extensómetros de fita.....	66
4.5.2. Extensómetro de fundação	68
4.5.3. Extensómetros de corda vibrante.....	69

4.5.4.	Extensómetros magnéticos	70
4.6.	Convergenciómetros	71
4.6.1.	Convergenciómetro de haste	72
4.6.2.	Convergenciómetro de fita	73
4.7.	Fibras ópticas	73
4.8.	Fio-de-prumo	76
5.	Aplicação das metodologias de observação em obras geotécnicas	79
5.1.	Barragens	79
5.1.1.	Barragens de aterro.....	80
5.1.2.	Barragens de betão	81
5.2.	Túneis	86
5.3.	Movimento de terrenos.....	88
5.4.	Muros de suporte.....	89
6.	Perspectivas	91
7.	Considerações finais	93
8.	Referências bibliográficas	97

Índice de figuras

Figura 1.1 - Principais intervenientes na observação de obras geotécnicas	5
Figura 2.1 - Metro de Chicago	13
Figura 3.1- Alvo reflector	19
Figura 3.2- Prisma reflector	19
Figura 3.3 - Peça de centragem forçada tipo Kern	19
Figura 3.4 - Peça de centragem forçada tipo Wild	19
Figura 3.5 - Pontos de medida	20
Figura 3.6- Pilar de referência	21
Figura 3.7 – Pormenor da tampa de protecção do pilar de estacionamento	21
Figura 3.8 – Pilar de estacionamento	21
Figura 3.9 – Pilaretes instalados ao longo da banquetta do paramento de jusante	21
Figura 3.10 – Pormenor de peça de centragem forçada num pilarete	21
Figura 3.11 - Taco de nivelamento.	21
Figura 3.12 - Barragem de Schräh	24
Figura 3.13 - Barragem de Schräh, exemplo de esquema de observação geodésico para a medição de ede deslocamentos	24
Figura 3.14 - Barragem de Schräh, modelo tri-dimensional das deformações	25
Figura 3.15 – Teodolito	26
Figura 3.16 - Distanciómetro electromagnético Leica	27
Figura 3.17 – Taqueómetro	28
Figura 3.18 - Redes de monitorização Este e Oeste: pontos de controlo, pontos verificação, pontos de passagem e pontos estação	29
Figura 3.19 - Barragem do Loureiro	34
Figura 3.20 - Barragem do Loureiro. Localização dos pontos objecto e pontos de referência	34
Figura 3.21 – Rede GPS de Assisi – configuração original de 1995	37
Figura 3.22 – Localização e fronteiras estimadas do deslizamento de terrenos	37
Figura 3.23 - Barragem do Lapão	39
Figura 3.24 - Barragem do Lapão – Localização das marcas superficiais (MS) e das estações referência (RM)	40
Figura 4.1- Precisão e exactidão	43
Figura 4.2 – Inclínómetro – Princípio de funcionamento	46
Figura 4.3 - Tubo inclinométrico	48
Figura 4.4 - Secção do tubo inclinométrico	48
Figura 4.5 - Tubo inclinométrico instalado numa barragem	48
Figura 4.6 - Barragem do Penedrão - instalação de um tubo inclinométrico durante a construção	49
Figura 4.7 - Esquema de uma sonda inclinométrica	50
Figura 4.8 – Eixos para as leituras de inclinómetros	50
Figura 4.9 - Sonda inclinométrica	51
Figura 4.10 - PDA e fixador.	51
Figura 4.11 - Esquema da sonda inclinométrica com o princípio de cálculo dos deslocamento	51
Figura 4.13- Inclínómetro horizontal com uma extremidade fechada	52
Figura 4.12 - Inclínómetro horizontal com as duas extremidades abertas	52
Figura 4.14 - Pormenor da extremidade fechada do inclinómetro	53
Figura 4.15 - Esquema de uma sonda inclinométrica horizontal	53
Figura 4.16 - Sonda inclinométrica <i>in-place</i>	55
Figura 4.17 - Sistema INCREX	57
Figura 4.18 –Tubo INCREX	58
Figura 4.19 - Elementos que constituem o INCREX	58
Figura 4.20- Unidade de leitura do INCREX	58

Figura 4.21- INCREX. Instalação -----	59
Figura 4.22 - Perfil transversal tipo -----	60
Figura 4.23 - Instalação dos instrumentos durante a construção -----	62
Figura 4.24 – Deslocamentos verticais medidos nos dois aterros instrumentados na A10 -----	63
Figura 4.25 - Esquema tipo da instalação de um assentímetro -----	65
Figura 4.26 - Célula de furo de sondagem -----	65
Figura 4.27 – Célula do assentímetro -----	65
Figura 4.28 - Extensómetro de fita -----	66
Figura 4.29 – Exemplo da utilização do extensómetro de fita. Monitorização da eficácia do revestimento do betão projectado (NATM) -----	67
Figura 4.30 - Pontos de referência instalados em furos no revestimento de betão -----	67
Figura 4.31 - Pontos de referência solidarizados em furos efectuados em rocha -----	67
Figura 4.32 - Extensómetro de fundação com duas varas instalado numa galeria -----	68
Figura 4.33 - Deflectómetro do extensómetro de fundação -----	68
Figura 4.34 - Extensómetro de fundação instalado num furo de sondagem -----	69
Figura 4.35 - Extensómetro de fundação múltiplo -----	69
Figura 4.36 - Extensómetro de corda vibrante -----	70
Figura 4.37 - Instalação de um magneto extensómetro num furo de sondagem -----	71
Figura 4.38 - Elementos que constituem o magnetoextensómetro -----	71
Figura 4.39 - Convergençiómetro de haste -----	72
Figura 4.40 - Convergençiómetro de fita -----	73
Figura 4.41 - Esquema de uma fibra óptica -----	74
Figura 4.42 – Fio- de-prumo directo -----	76
Figura 4.43 – Fio- de- prumo invertido -----	76
Figura 5.1 - Esquema de um sistema de observação numa barragem de aterro -----	80
Figura 5.2 - Barragem de gravidade – Esquema geral de observação -----	82
Figura 5.3- Barragem de gravidade. Observação da fundação -----	83
Figura 5.4 - Barragem de betão. Observação da fundação -----	85
Figura 5.5 – Possível sistema de observação de uma secção de um túnel -----	87
Figura 5.6 - Observação de um talude -----	89

Índice de tabelas

Tabela 2.1 – Procedimentos gerais de monitorização ----- 10

Tabela 5.1 - Instrumentos adequados para observação de deformações em túneis-----87

Tabela 5.2- Instrumentos adequados para monitorização de escavações----- 90

Abreviaturas

ANPC- Autoridade Nacional de Protecção Civil

BCC- Betão compactada a cilindro

FOS- Fibre Optic Sensors

GLS- Geodetic Laser Scanning

GNSS- Global Navigation Satellite System

LNEC- Laboratório Nacional de Engenharia Civil

NATM- New Austrian Tunneling Method

RSB- Regulamento de Segurança de Barragens

SFO – Sensores de Fibra Óptica

SPT – Standard Penetration Test

1. Introdução

A presente dissertação insere-se no Mestrado em Engenharia Geológica (Geotecnia), da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa e refere-se aos métodos de medição de deslocamentos em obras geotécnicas, sejam eles superficiais ou internos.

Todas as obras de engenharia civil são planeadas visando a satisfação de necessidades concretas das populações (pessoas individuais ou comunidades de dimensão variada) e pressupõem sempre alterações do meio ambiente. Mesmo a realização de obras de conservação e de manutenção de estruturas já construídas originam impactes ambientais positivos – a satisfação das necessidades das populações ou da correcção de problemas ambientais originados por outras obras – e negativos, que devem ser avaliados e ponderados no âmbito dos estudos de viabilidade realizados durante a fase do planeamento, prevendo-se, sempre que necessário, medidas de mitigação dos impactes negativos (Castro, 2002).

Segundo o mesmo autor, a observação do desempenho das obras assume uma importância relevante, em particular nas de maior dimensão e nas que têm maior impacte no ambiente. Embora, de início, a principal preocupação associada à observação das obras estivesse relacionada com a verificação das condições de segurança das estruturas, actualmente a observação tem uma importância acrescida, designadamente no apoio ao projecto durante o período construtivo, em particular nas obras geotécnicas, dadas as dificuldades associadas à caracterização dos meios em que se executam os trabalhos.

Para as obras de maior importância existem regulamentos que definem princípios gerais a ter em conta na observação do seu comportamento e indicam os responsáveis pela realização das actividades correspondentes. No caso das grandes barragens, cuja rotura pode originar perdas significativas de vidas humanas e de bens materiais, o Estado publicou em 1990, sob a forma de um decreto-Lei (11/90, de 6 de Janeiro), um Regulamento de Segurança de Barragens (RSB) e, sob a forma de portarias, um conjunto de Normas relativas ao projecto, à construção e à observação e inspecção de barragens (adaptado de Castro, 2002).

O referido decreto-Lei foi entretanto revisto e publicado em Diário da República em 15 de Outubro de 2007 (344/2007), estando as normas em fase de revisão.

Importa salientar que um sistema de observação é um conjunto de instrumentos e dispositivos destinados a medir grandezas (relativas às acções, às propriedades estruturais e às respostas das estruturas ou dos maciços que as suportam ou integram) que contribuem para o conhecimento do comportamento da obra ou dos seus elementos visando, no essencial, a avaliação da sua segurança e, na fase de serviço, também da sua funcionalidade (em determinados tipos de obras assume ainda particular relevo a aferição e adaptação, face às características exibidas pelas obras, do projecto e dos métodos construtivos) (Silva Gomes, 2002).

As obras geotécnicas são aquelas em que os solos e/ou as rochas assumem particular relevância do ponto de vista estrutural, tais como barragens de aterro, aterros ferro e rodoviários, túneis, estruturas de suporte, cavidades, poços, ancoragens, escavações a céu aberto em solos e em rochas e fundações (Silva Gomes, 2002).

Durante a construção das obras as actividades de observação centram-se fundamentalmente na implementação dos sistemas de observação definidos na fase de projecto, na caracterização das propriedades dos materiais e na avaliação das condições de segurança das diferentes componentes da obra.

Para além da instrumentação prevista para o controlo da segurança durante a exploração da obra, pode colocar-se instrumentação específica tendo em vista a avaliação do comportamento da obra durante a construção. Nesta fase a interpretação de resultados é efectuada fundamentalmente em termos de tendências, uma vez que ainda existem poucos elementos objectivos que permitam caracterizar adequadamente o comportamento das obras. Isto é, em vez de se verificar se os valores observados se encontram dentro de determinadas bandas pré-definidas, verifica-se se entre campanhas de observação sucessivas existem variações nas grandezas observadas que não sejam explicadas pela sequência de trabalhos de construção ou de outras solicitações importantes (Castro, 2002).

Segundo o mesmo autor, as medições efectuadas durante a construção podem também dar informações relevantes aos projectistas acerca das reais propriedades do meio geotécnico em que se desenrolam os trabalhos.

Na generalidade das obras geotécnicas e, em particular, naquelas em que os riscos associados se concentrem essencialmente na fase de construção, atendendo à perturbação que as obras introduzem no meio envolvente e nas infra-estruturas localizadas na sua área de influência, a observação na fase de construção é determinante (Silva Gomes, 2002).

Já no período de exploração normal as preocupações fundamentais da observação das obras relacionam-se com o controlo da sua segurança. As condições de segurança são verificadas a partir da interpretação dos resultados da observação com base no estabelecimento de correlações entre as acções, as propriedades estruturais (que incluem as propriedades dos materiais, a geometria, o zonamento dos diversos materiais, a definição e caracterização das principais descontinuidades, etc.), e as respostas da estrutura. Estas respostas, expressas em termos de deslocamentos, tensões, caudais drenados, etc., são confrontadas com valores previstos por modelos de comportamento que têm em conta as acções observadas e as propriedades dos materiais estimadas ou caracterizadas durante o período construtivo (Castro, 2002).

1.1. Os sistemas de observação

Segundo Silva Gomes (2002), o sistema de observação de uma obra geotécnica abrange alguns aspectos que devem integrar o chamado Plano de Observação, que pode ser definido como o documento no qual se definem as grandezas e os respectivos equipamentos de observação, se dão orientações para a instalação e a exploração desses equipamentos e ainda se esquematizam as inspecções visuais a efectuar. Este documento deve incluir:

- a) a definição dos objectivos gerais da observação e a tipologia das grandezas e dos equipamentos;
- b) a identificação dos cenários de comportamento associados à construção e à exploração da obra, com particular relevo para os que têm incidência na segurança e/ou na funcionalidade;
- c) definição das grandezas a observar tendo em conta os cenários identificados e a selecção dos respectivos equipamentos (incluindo os acessórios);
- d) definição das quantidades e da localização em obra dos equipamentos de observação e respectivos acessórios;
- e) especificação dos métodos e técnicas envolvidos na instalação dos equipamentos de observação, considerando as eventuais incidências no processo construtivo; quando se justifique, deve ainda ser definida a programação da leitura dos equipamentos, em particular quando haja necessidade ou conveniência em avaliar a variação dos valores das grandezas, por efeito das acções construtivas ou outras, em relação ao estado inicial;
- f) indicações sobre a forma e o conteúdo dos relatos sobre a instalação dos equipamentos de observação efectivamente instalados;
- g) qualificações académicas e técnicas dos agentes encarregados da instalação do sistema de observação, com referência às componentes que exigem habilitações específicas;
- h) instruções sobre o uso das unidades de leitura;
- i) definição das frequências de leitura em condições normais (nas várias fases da vida da obra), no caso da variação significativa dos valores ou das taxas de evolução dos resultados e em condições excepcionais;
- j) qualificações académicas e técnicas dos agentes encarregados das leituras dos equipamentos de observação;
- k) algoritmos de cálculo que transformam os dados (valores de leituras) em resultados (valores de grandezas físicas);
- l) limites de validação dos dados e dos resultados e, quando possível, os limites de atenção, alerta e de intervenção em termos de valores absolutos ou de taxas de variação, nas várias fases da obra;
- m) frequência e forma de apresentação dos resultados;
- n) os métodos de análise dos resultados e os modelos de interpretação do comportamento;

- o) fluxos de informação relativa à observação e as cadeias de decisão face à verificação de situações correspondentes aos limites de atenção, de alerta ou de intervenção ou à ocorrência de situações excepcionais;
- p) forma e conteúdo dos relatórios com análise dos resultados e os modelos de interpretação do comportamento;
- q) métodos e técnicas a utilizar na manutenção dos equipamentos de observação, dos seus acessórios e das unidades de leitura e a frequência das respectivas operações.

Os limites supracitados na alínea l) dividem-se em:

- i) *limites de atenção* – que não se integram nos valores ou taxas de variação que seriam de esperar, embora ainda não tenham atingido um valor preocupante para a segurança. Estes limites exigem uma averiguação por parte dos responsáveis pela análise dos resultados e pela interpretação do comportamento, uma atenção especial, uma vez que podem indicar a ocorrência de anomalias cuja importância, do ponto de vista da segurança, exigem uma análise, mantendo uma especial atenção à sua evolução (em particular a confirmação de que os fenómenos estão em evolução implica um aumento da frequência das leituras);
- ii) *limites de alerta* – valores ou taxas de variação que, de acordo com os cenários que fundamentaram a sua fixação, podem indicar a ocorrência de situações susceptíveis de afectar a segurança da obra ou das estruturas localizadas na sua zona de influência a curto prazo, com eventual risco para pessoas e bens; este alerta deve começar por ser um alerta técnico, ou seja, exclusivamente do foro dos responsáveis pela análise dos resultados e pela interpretação do comportamento da obra que, depois de uma avaliação da situação, devem decidir sobre as medidas a adoptar e;
- iii) *limites de intervenção* – valores ou taxas de variação que implicam uma acção imediata (suspensão de trabalhos, reforço das condições de segurança, evacuação da zona de risco, etc) decidida no âmbito das acções de contingência, independentemente da avaliação da situação.

Na definição destes limites está implícito o apoio dos modelos de comportamento adoptados e a consideração de que a ocorrência destes valores ou taxas de variação corresponde à instalação de um mecanismo de instabilização cujo desenvolvimento pode pôr em causa a segurança de pessoas e bens.

Numa obra geotécnica regista-se a interferência de técnicos de várias especialidade e de várias entidades, cada um deles com uma função a desempenhar também na observação da obra.

Assim, e por exemplo de acordo com o Regulamento de Segurança de Barragens, as entidades envolvidas no controlo de segurança das barragens são: a Autoridade, o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), o Dono de Obra, o Projectista, a Comissão de Segurança de Barragens e a Autoridade Nacional de Protecção Civil (ANPC).

Na figura 1.1 está representada a relação entre os diferentes intervenientes no controlo de segurança das barragens abrangidas pelo RSB.

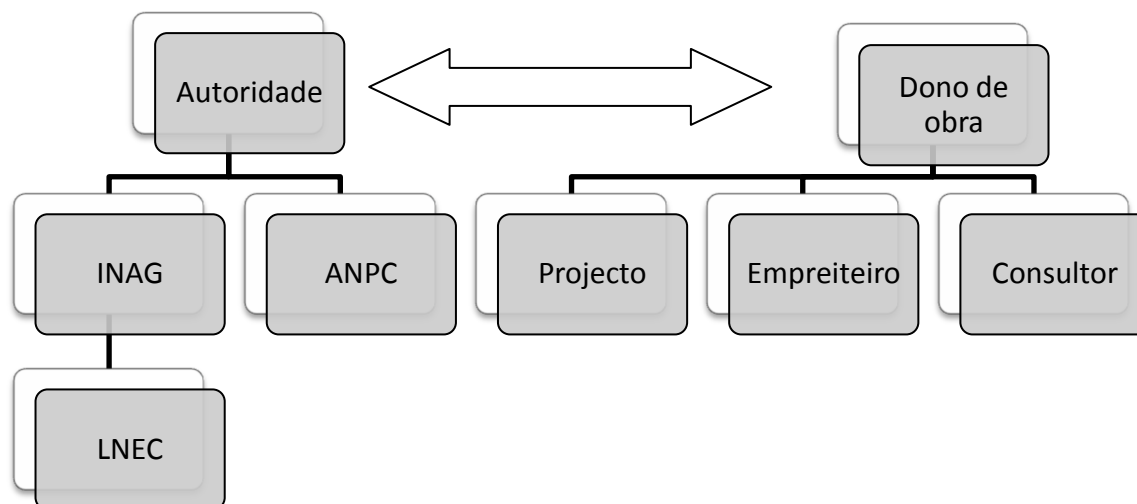


Figura 1.1 - Principais intervenientes na observação de obras geotécnicas

A Autoridade tem, neste contexto, como função a aprovação dos planos de observação e, juntamente com a ANPC, a definição dos planos de emergência.

O LNEC tem a cargo, para as barragens relativamente às quais lhe foi atribuída pela Autoridade, uma intervenção de carácter sistemático, entre outros, a revisão dos planos de observação, o controlo da implementação desses planos de dados e a realização das inspecções visuais.

O projecto deve incluir um plano de observação a rever posteriormente pelo LNEC, onde se definem as grandezas a medir e os cenários possíveis que possam ocorrer durante a fase construtiva e na vida útil da obra.

O Dono de Obra tem à sua responsabilidade, neste contexto a implementação do plano de observação.

As medidas tomadas de maneira a salvaguardar a segurança de uma obra estão a cargo da Comissão de segurança de barragens e, os planos de emergência e a coordenação das acções de salvamento são da responsabilidade da Autoridade Nacional de Protecção Civil (RSB, 2007).

A presente dissertação encontra-se dividida em sete capítulos: o primeiro, a Introdução, que integra o objectivo, a razão de ser da selecção deste tema e a estrutura do trabalho.

No segundo capítulo, descrevem-se, de uma forma geral, os objectivos da observação de obras geotécnicas, bem como o modo como a observação geotécnica contribui para a redução de custos e de riscos associados a este tipo de obras.

O terceiro capítulo foca-se nas metodologias de medição de deslocamentos superficiais na óptica do utilizador. Neste capítulo são abordados os deslocamentos em planimetria, em altimetria e nas três coordenadas mediante métodos topográficos e geodésicos, como a triangulação, trilateração e poligonação, *Global Navigation Satellite System* (GNSS), varrimento laser e fotogrametria.

O quarto capítulo foca em particular os deslocamentos internos. São referidos alguns dispositivos de medição de deslocamentos internos em obras geotécnicas, onde se confere especial importância ao princípio de funcionamento, à instalação e exploração e, sempre que possível, à análise dos resultados.

No quinto capítulo aborda-se a aplicação dos equipamentos de observação a diferentes tipos de obras geotécnicas, como barragens, túneis, muros de suporte.

O sexto capítulo refere-se às perspectivas futuras.

E, por fim, o capítulo sete integra as considerações finais do trabalho.

Todas as fotografias que não estão referenciadas são propriedade do autor.

2. Objectivos da observação em obras geotécnicas

Como já foi referido anteriormente, entende-se por sistema de observação o conjunto de instrumentos e dispositivos destinados a medir grandezas (relativas às acções, a propriedades estruturais e às respostas das estruturas ou dos maciços que as suportam ou integram) que contribuam para o conhecimento do comportamento da obra ou dos seus elementos visando, no essencial, a avaliação da sua segurança e, na fase de serviço, também a sua funcionalidade (e, em determinados tipos de obras assume ainda particular relevo a aferição e adaptação, face às respectivas características, do projecto e dos métodos construtivos) (Silva Gomes, 2002).

Os objectivos da observação, das obras geotécnicas merecem, da parte de diferentes autores consagrados, importância e prioridades diferenciadas. Seguem-se exemplos, apresentados sob a forma de conceitos ou listas, por alguns autores cuja bibliografia foi consultada no contexto da presente dissertação.

A observação em obras geotécnicas tem como objectivo monitorizar o comportamento e as características do terreno de modo a prever o seu comportamento quando este é sujeito a cargas, movimentos e outras acções que podem ter origem em fenómenos naturais ou originadas pela acção do Homem (Vallejo et al., 2006).

Para Dunnicliff e Powderham (2001) os objectivos da observação de obras geotécnicas são:

- i) a protecção de propriedades de terceiros susceptíveis de serem afectadas pelos estudos, construção e exploração das obras;
- ii) o controlo do método de construção;
- iii) a averiguação do comportamento, caso surjam valores anómalos;
- iv) a protecção legal, caso ocorram incidentes ou acidentes e seja necessário dirimir a atribuição de responsabilidades;
- v) o reforço das relações entre as diferentes partes envolvidas (dono de obra, projectista, empreiteiro, fiscalização, consultores, entidades terceiras, etc) e;
- vi) o desenvolvimento dos conhecimentos técnico-científicos e do estado da arte.

Hanna (1985) indica dois objectivos principais para a observação das obras geotécnicas:

- a) A contribuição para a determinação de deformações in situ, por exemplo, mediante a realização de ensaios de placa, de ensaios de carga em estacas e na avaliação dos parâmetros mecânicos dos terrenos;
- b) o controlo da construção mediante, nomeadamente:
 - i) o registo das alterações no nível da água no solo;
 - ii) medição de movimentos e de vibrações;

- iii) a confirmação de que a construção está a seguir todas as especificações definidas em projecto;
- iv) o processamento, análise e interpretação do comportamento visando garantir a segurança durante a construção;
- v) as medições relativas ao desempenho da estrutura em fase de exploração;
- vi) a execução de ensaios em larga escala (a realização de ensaios deste tipo implica habitualmente a mobilização de equipamentos de grande porte e a instalação e utilização de equipamentos de observação específicos).

Marr (2001) considera por seu turno, que a eficiência e a eficácia de um sistema de observação depende do seu planeamento, especificando os dispositivos a serem utilizados, a aquisição de hardware, a recolha de informação, a análise e a interpretação dos resultados, a elaboração de relatórios e a definição das intervenções, em tempo útil, a adoptar, em função das conclusões obtidas.

O mesmo autor apresenta, de uma maneira sucinta, as principais razões técnicas que podem indicar a necessidade de incluir um plano de observação em projectos de obras geotécnicas, as quais se referem, designadamente:

- a) à detecção, em tempo útil, da possibilidade de ocorrerem falhas iminentes;
- b) à emissão de alertas no caso de ocorrerem valores anómalos;
- c) à avaliação da validade dos pressupostos fundamentais utilizados no dimensionamento;
- d) à aferição relativa aos meios e aos métodos de construção;
- e) à minimização de danos em estruturas adjacentes;
- f) ao controlo de qualidade da construção;
- g) à utilização de métodos e dispositivos para reduzir as consequências dos danos que possam ocorrer;
- h) à disposição de documentos de desempenho para a avaliação de danos;
- i) ao cumprimento de regulamentação;
- j) à redução de litígios envolvendo os vários intervenientes;
- l) à contribuição para o desenvolvimento de técnicas e de conhecimentos.

As falhas estruturais em obras geotécnicas podem ter consequências catastróficas envolvendo a perda de vidas humanas e prejuízos materiais e ambientais importantes. Estas falhas podem ter várias origens, desde cargas excessivas, erros de dimensionamento, deficiências na construção, condições de terreno desconhecidas ou diferentes das consideradas inicialmente no projecto, erros operacionais e até sabotagens.

A observação das obras geotécnicas é actualmente inquestionável, pelo que tem vindo a ser usada amplamente, visando, em particular, a detecção, em tempo útil, da possibilidade da ocorrência de falhas, permitindo, por exemplo, a evacuação de pessoas e a remoção de equipamentos de locais em perigo, caso as evidências decorrentes da exploração do sistema de observação ou os resultados das inspecções visuais o justifique.

Nas fases de estudo ou nas fases preliminares das obras geotécnicas, a instalação de instrumentos e de dispositivos de observação, complementada com as inspecções visuais, possibilita a implementação de modificações que se revelem necessárias, em função dos resultados obtidos, reduzindo, desta forma, o risco de falhas.

Parte ou a totalidade dos instrumentos e dispositivos de observação visam, para além dos objectivos comuns da observação, providenciar avisos se qualquer um dos indicadores de alerta exceder os limites pré-estabelecidos. Estes equipamentos podem funcionar de uma forma automática, isto é, sem intervenção humana, emitindo avisos, de diferente importância relativa, quando os valores de alerta forem excedidos. Tais avisos, após a respectiva apreciação pelos responsáveis pelo controlo de segurança das obras, permitem as intervenções necessárias que podem incluir, quando se justifique, a evacuação das populações eventualmente afectadas e evitar a ocorrência de eventos indesejáveis (Marr, 2001).

Seja qual for o tipo de obra geotécnica não é possível prever, de uma forma precisa, o seu comportamento. Por outro lado, tendo em conta a relação benefício/custo, não se devem adoptar atitudes muito conservativas em relação à segurança, nem descurar este aspecto, uma vez que os danos potenciais associados à falta de segurança podem ser elevados.

O sistema de observação implementado de acordo com o respectivo plano e com as adaptações decorrentes da consideração das condições reais da obra permite monitorizar o comportamento das estruturas. A informação recolhida é utilizada para identificar potenciais resultados indesejáveis, incluindo falhas no dimensionamento, e intervir desde a fase inicial da execução da obra. Complementarmente, contribui para esclarecer questões que possam surgir no decorrer da obra e reduzir as incertezas.

Não é possível, por razões técnicas e económicas, conceber e implementar um programa de prospecção de maneira a eliminar todas as incertezas acerca das condições geotécnicas do terreno, em particular as associadas aos parâmetros e hipóteses adoptados no dimensionamento.

Assim, admitem-se hipóteses simplificadas acerca das condições do terreno e arbitram-se para o dimensionamento, com base nos resultados disponíveis, hipóteses razoavelmente conservativas.

Se se verificar que a adopção de hipóteses incorrectas pode implicar a ocorrência de consequências inaceitáveis, recorre-se à instrumentação geotécnica de maneira a reunir informação que permita, no decurso da execução da obra, ir avaliando as hipóteses consideradas críticas.

Para que esta estratégia resulte, é necessário que, no dimensionamento de estruturas, se admita, à partida, a possibilidade de proceder a alterações, caso a observação mostre que uma ou mais hipóteses, nomeadamente do conjunto das consideradas críticas, eram

incorrectas, atitude que viabiliza a adopção de um dimensionamento menos conservativo e mais económico.

A observação geotécnica é ainda utilizada, como já foi referido, para avaliar se os meios e os métodos de construção estão conformes com o projecto e o Caderno de Encargos. Um sistema de observação adequado providencia na fase inicial da obra, informação fiável e identifica potenciais operações indesejáveis. E, reforçando o ponto de vista atrás expresso, indica ainda se os meios e métodos de construção preconizados estão a ser correctamente utilizados e de que maneira podem ser alterados de forma a maximizar os seus objectivos.

Frequentemente, as obras geotécnicas afectam infra-estruturas localizadas para além das suas fronteiras tendo como consequência reparações onerosas, indemnizações e eventuais processos litigiosos. Neste contexto, a observação deve incluir a caracterização do estado de referência das estruturas susceptíveis de ser afectadas pela execução das obras geotécnicas e a avaliação do seu estado em função da evolução das obras visando eliminar ou pelo menos reduzir os danos.

Este aspecto assume particular relevo nos meios urbanos, onde a falta de espaço à superfície obriga à utilização do espaço subterrâneo onde é necessária a monitorização do comportamento geotécnico de maneira a controlar a construção (Marr, 2001).

Segundo Hanna (1985), é claro que haverá sempre discrepâncias entre o comportamento previsto e o comportamento efectivo das estruturas. Este facto justifica que o dimensionamento tenda a ser conservativo, embora, na maior parte dos casos, mesmo com a adopção de critérios conservativos, em particular as obras subterrâneas, possam revelar, em especial durante a fase de construção, debilidades em termos de segurança.

Hanna (1985), recomenda a adopção dos procedimentos que constam na tabela 2.1 e lista os tipos de estruturas ou processos que requerem observação.

Tabela 2.1 – Procedimentos gerais de monitorização (adaptado de Hanna, 1985)

Antes da construção	<ul style="list-style-type: none">- ensaios in situ- medições das pressões intersticiais- ensaios estruturais- estudos de fluência
Durante a construção	<ul style="list-style-type: none">- controlo da aplicação de cargas- controlo do excesso de pressões nos poros- comparação dos valores previstos no projecto com os valores medidos
Após construção	<ul style="list-style-type: none">- validação das hipóteses de dimensionamento- observação do desempenho a longo prazo- verificação de eventuais alterações de comportamento- evolução do dimensionamento
Ensaio de campo (antes, durante e após a construção)	<ul style="list-style-type: none">- verificação da necessidade da realização de ensaios em larga escala nas estruturas e/ou nos elementos estruturais
Obras e zonas envolventes Estudos preliminares	<ul style="list-style-type: none">- evolução da adequação de um dimensionamento, processo ou sistema sujeitando-o a um cuidadoso processo controlado e monitorizado

Na tabela 2.2 estão listadas, de uma maneira geral, as estruturas que requerem observação.

Tabela 2.2- Tipos de estruturas que requerem observação (adaptado de Hanna, 1985).

Fundações	<ul style="list-style-type: none">- de edifícios- de pontes- de torres- de reservatórios de água e- de chaminés
Conjuntos estruturas/fundações	<ul style="list-style-type: none">- aterros- barragens- ilhas artificiais- estruturas de terra armada
Estruturas de suporte	<ul style="list-style-type: none">- muros de suporte- estacas prancha- paredes moldadas- muros de gabiões e- estruturas celulares
Outros tipos de fundações	<ul style="list-style-type: none">- estacas e sapatas- poços, fundações em concha- fundações por estacas e- fundações de ensecadeiras
Melhoramento de terrenos	<ul style="list-style-type: none">- pré-consolidação- injeções- vibrosubstituição- consolidação dinâmica- compactação
Estruturas marítimas	<ul style="list-style-type: none">- plataformas de gravidade- plataformas revestidas- plataformas ancoradas
Aterros sanitários	<ul style="list-style-type: none">- lagoas de recuperação- depósitos de lixo nuclear e- depósitos de lixo perigoso
Minas	<ul style="list-style-type: none">- mineração de metalúrgicos e carvão, extracção de petróleo,mineração de sal
Taludes	<ul style="list-style-type: none">- abertura de galerias, taludes susceptíveis de provocar queda de blocos- escorregamento de terrenos
Ensaio físicos e mecânicos	<ul style="list-style-type: none">- história de tensão/deformação, fluência e percolação de águas subterrâneas

Assim e, segundo Sêco e Pinto (2000), a partir dos dados obtidos na observação de obras geotécnicas consegue-se validar os parâmetros preconizados no projecto, o modelo teórico e efectuar as respectivas alterações, se necessário, durante a construção. Permite ainda a análise do comportamento da estrutura durante a sua vida útil e a identificação de comportamentos menos desejados das estruturas, o que permite uma intervenção atempada caso seja necessário. Da observação das obras geotécnicas recolhe-se também

informação que pode ser útil em ocasiões futuras e em obras semelhantes, permitindo desta maneira a construção de estruturas mais económicas e seguras.

2.1. Importância do método observacional

O método observacional, inicialmente utilizado por Karl Terzaghi, foi posteriormente sistematizado por Ralph Peck na “Rankine Lecture”, em 1969, possibilitando a adaptação do projecto durante a fase construtiva e implica a satisfação dos seguintes requisitos:

- estabelecimento dos limites de comportamento aceitável;
- definição dos limites admissíveis do comportamento da estrutura e demonstração de uma razoável probabilidade do comportamento real se situar dentro desses limites;
- elaboração de um plano de observação, que deverá incluir a definição de medidas correctivas a serem implementadas atempadamente;
- definição de um plano de actuação a ser posto em prática no caso de ocorrência de comportamentos anómalos – Plano de contingência (Seco e Pinto, 2000).

Segundo Peck os trabalhos de construção devem iniciar-se com base nas condições mais prováveis e em previsões de comportamento.

Se os resultados obtidos não estiverem de acordo com os previstos devem ser accionados mecanismos pré-estabelecidos de modo a proceder-se aos ajustes necessários ao projecto e/ou aos métodos construtivos (Caspurro, 1999).

No método observacional também é possível desenvolver cálculos baseados nas condições mais desfavoráveis com o objectivo de identificar zonas da obra com maior risco e definir os níveis de alarme para o sistema de observação.

A mesma autora sumariza a aplicação do método observacional nos seguintes pontos:

- a) Caracterização geotécnica que permita estabelecer, em termos gerais, a natureza, o modelo e as propriedades dos terrenos, sem entrar em demasiado detalhe;
- b) definição das condições mais prováveis e dos desvios mais desfavoráveis dessas mesmas condições, de maneira a antecipar cenários de incidentes ou acidentes e a possibilidade de tratamentos especiais;
- c) dimensionamento do projecto baseado em previsões de comportamento sob as condições prováveis;
- d) estabelecimento de um plano de observação (grandezas a medir, equipamentos a instalar, exploração do sistema de observação e cadeias de comunicação) e de níveis de alarme de acordo com os pressupostos de projecto;
- e) avaliação do projecto e dos métodos construtivos às condições observadas durante a construção;
- f) adaptação do projecto e dos métodos construtivos às condições observadas durante a construção.

Para o método observacional ser aplicado com sucesso é necessário que seja possível alterar o projecto durante a construção e que:

- as condições contratuais sejam compatíveis e permitam alterar o projecto e os métodos construtivos de acordo com as condições que se forem constatando;
- seja definido e controlado um nível de risco aceitável;
- se identifiquem e observem as grandezas críticas.

Um bom exemplo de como o método observacional pode ser simples e salvar vidas e permitir a redução de custos de uma obra foi a construção de uma das estações do metro de Chicago (figura 2.1.) e foi apresentado por Ralph Peck em 1969 na Lição Rankine (Peck, 2000).

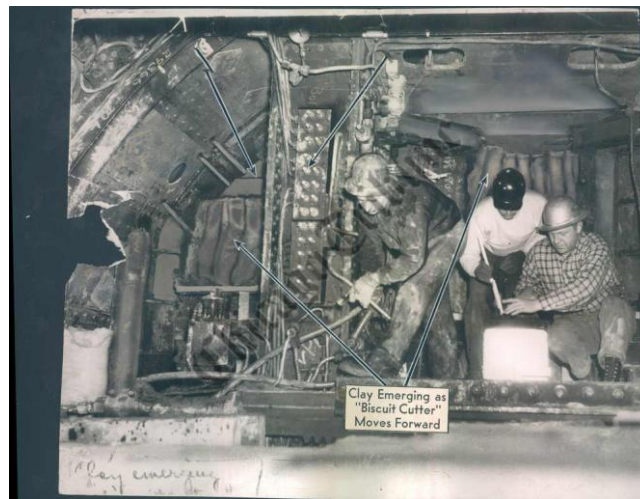


Figura 2.1 - Metro de Chicago (Chicago Tribune, 2011)

O método de construção utilizado na Chicago Avenue Station, na North State Street foi designado “hand mined rib-and-liner-plate method”¹, desenvolvido previamente pelo *Chicago Sanitary District* para a construção de interceptores de esgotos de grande diâmetro.

À superfície o progresso da abertura do túnel podia ser observado através dos assentamentos que se observavam à medida que a escavação avançava.

As operações de construção foram responsáveis por problemas sérios no trânsito, e por danos consideráveis nos edifícios. No entanto, o empreiteiro não teve em conta a relação danos/operações de abertura do túnel, afirmando que os assentamentos eram apenas consequências inevitáveis da construção de um túnel e que, por conseguinte, nada mais havia a fazer.

Karl Terzaghi, na qualidade de chefe de projecto, fazia visitas à obra a cada três a quatro semanas nos estados iniciais da obra e, em lugar de opinar sobre que mecanismos

¹ Método de abertura de túneis manual, com utilização de costelas e aduelas de sustentação.

poderiam estar a originar os assentamentos, sugeriu que se realizassem medições simples no interior do túnel, enquanto os trabalhos prosseguiam.

Para tal foram cravados pinos através das estruturas de sustentação e até a argila, à mesma altura em cada um dos hasteais do túnel. Realizaram-se medições da distância entre os pinos e repetiam-se as medições de tempos em tempos.

De uma maneira semelhante determinou-se através de medições, a cota da base das estacas colocadas a partir do coroamento do túnel, orientadas para a superfície.

Terzaghi mandou ainda cravar, quando possível e entre turnos *spearheads* e determinar a posição do seu extremo acessível relativamente a um ponto definido na parte de trás do túnel, considerado já como um ponto fixo, isto é, não influenciado pelas operações de escavação, e repetir as medições quando os *spearheads* estavam quase a ser encontradas pela frente de avanço.

Repetiram-se estas medições num ciclo mineiro completo, mantendo um registo actualizado da posição das frentes nas diversas furações e o registo da pressão de ar, tal como de toadas as outras ocorrências no túnel.

Entretanto foram registados os assentamentos que ocorreram nas vias e nos passeios localizados nas zonas das operações. Na altura de cada nova visita de Terzaghi, a equipa tinha reunido todas estas informações graficamente como resultado do chamado “squeeze test”.

Embora os dados obtidos estivessem longe de serem precisos, permitiram um cálculo, apesar de relativamente grosseiro, do volume do movimento interior da periferia do túnel e da frente, o qual se podia comparar com o valor dos assentamentos ocorrido à superfície durante um dado intervalo de tempo. K. Terzaghi verificou que os dois volumes eram aproximadamente iguais. Assim, o empreiteiro não pode continuar a argumentar que os assentamentos não estavam relacionados com o método construtivo utilizado no túnel. Confirmadas as evidências, o empreiteiro em causa, bem como outros empreiteiros que estavam a iniciar a sua parte na execução do túnel, começaram a ensaiar métodos de construção, diferentes dos até então utilizados, que aparentavam minimizar as perdas de terreno. Complementarmente foi atribuída maior importância às observações em curso.

Os túneis gémeos a cargo do primeiro empreiteiro foram concluídos antes que muitas das sugestões para refinamento do método fossem propostas e implementadas. O assentamento máximo total do centro da via foi de 22,86 cm. Um segundo empreiteiro utilizou o mesmo método de construção para um túnel da dimensão do primeiro, mas com os procedimentos refinados baseados nos *squeeze test* tendo atingido a fronteira entre contratos. As operações construtivas causaram, no entanto, um assentamento de apenas 7,62 cm. No primeiro túnel, os assentamentos foram suficientes para causar danos e interrupções consideráveis, enquanto que, no segundo, os danos foram praticamente insignificantes.

Assim, e sem o uso de nenhuma teoria, foi obtida uma melhoria acentuada nas operações da abertura de túneis, devida à aplicação do método observacional (Peck, 2000).

2.2. Inspeções visuais

As inspeções visuais são de grande importância, principalmente as que são realizadas na fase de exploração, uma vez que permitem detectar deteriorações que possam afectar a segurança e a funcionalidade das obras (Silva Gomes, 2002).

Segundo Sêco e Pinto (2000) nas inspeções visuais interessa analisar:

- tipo de inspeção visual que pode ser de rotina , de especialidade ou de carácter excepcional, em função da fase de vida e importância da obra e de ocorrências excepcionais;
- periodicidade das inspeções visuais;
- qualificação técnica dos agentes e sua capacidade para transformarem os sintomas observados em diagnósticos;
- realização obrigatória das inspeções após ocorrências excepcionais, designadamente grandes cheias ou sismos;
- principais aspectos das estruturas geotécnicas visando a detecção de deteriorações ou de sintomas de envelhecimento e do sistema de observação a serem observados;
- tratamento dos resultados de observação e sua transmissão.

3. Metodologias de medição de deslocamentos superficiais

Os deslocamentos de pontos superficiais são deslocamentos de referências visualmente acessíveis instaladas, por exemplo em, paramentos de barragens, superfícies de taludes, galerias ou túneis, paredes exteriores de edificações.

Estes pontos devem ser observados segundo as suas componentes verticais e horizontais, através de um sistema de pontos, materializados por marcas superficiais colocadas na zona da obra que interessa controlar e, eventualmente na sua vizinhança (Caspurro, 1999).

Os métodos de observação de deslocamento de pontos superficiais podem ser:

- topográficos;
- geodésicos;
- poligonação;
- *Global Navigation Satellite System*;
- varrimento laser;
- fotogrametria.

Nos itens que se seguem serão tratados, do ponto de vista do utilizador, atendendo a que se trata de métodos muito específicos que carecem de especialização apropriada, habitualmente do âmbito da engenharia geográfica.

3.1. Métodos topográficos e geodésicos

3.1.1. Generalidades

Estes métodos aplicados à observação de barragens tiveram origem nos anos 20 do século XX na Suíça e surgem da necessidade de estudar o comportamento das estruturas, numa época em que se tinha iniciado a construção de várias barragens de betão e a segurança das populações a jusante das barragens era uma preocupação para os engenheiros responsáveis pelas obras (Rueger, 2006).

No contexto do presente trabalho, ou seja, naquilo que diz respeito a observações de obras geotécnicas, a distinção entre métodos topográficos e métodos geodésicos relaciona-se apenas com o grau de precisão das campanhas efectuadas, assim:

- i) métodos topográficos quando apenas se pretende precisões na ordem dos centímetros e;
- ii) métodos geodésicos quando a precisão pretendida é da ordem milímetros.

Independentemente do método utilizado, as grandezas medidas em ambos os casos são genericamente as mesmas:

- i) ângulos horizontais e verticais;
- ii) distâncias e;
- iii) desníveis.

Por definição os deslocamentos são espaciais (3D), mas de modo a obter-se uma melhor precisão faz-se uma divisão em:

- i) deslocamentos verticais (altimétricos);
- ii) deslocamentos horizontais (planimétricos) e;
- iii) deslocamentos espaciais (3D).

Os deslocamentos verticais são determinados através de nivelamentos trigonométricos ou de nivelamentos geométricos. Os nivelamentos trigonométricos são utilizados para determinar altitudes por medição de ângulos verticais, por vezes complementados com a medição de distâncias, sendo menos precisos que os nivelamentos geométricos, mas com a vantagem de serem mais rápidos, pois são efectuados ao mesmo tempo que as restantes observações angulares.

O início das leituras corresponde à realização das leituras de referência. A maior parte das medições na Engenharia Civil são relativas, calculando-se a variação da grandeza física por comparação com uma leitura de origem (leitura de referência). Se a leitura de referência contiver incorrecções todas as leituras posteriores irão ser influenciadas pelos correspondentes erros. Daí a importância da leitura de referência e as recomendações para que seja feita com o maior cuidado e rigor (Caspurro, 1999).

A rede de observação é constituída por pontos materializados por pilares solidarizados a blocos de betão fundados na estrutura subjacente. Estes pontos podem ser classificados, segundo a sua função no sistema, em:

- **Pontos objecto** (figura 3.9 e figura 3.10), que são os pontos cujos deslocamentos se pretendem determinar. São materializados por pilaretes que usualmente são peças de betão moldadas numa manilha de 0,20 a 0,30 m de diâmetro e de 0,60 m de altura, executados sobre um bloco de betão com cerca de 1,0 m de aresta, equipados com peças de centragem forçada (figura 3.4);

- **Pontos de referência** (figura 3.6 e figura 3.8), também chamados de pontos de apoio ou pontos fixos, que são aqueles que a partir dos quais se determinam os deslocamentos dos pontos objecto. São materializados por pilares, usualmente peças de betão moldadas numa manilha com 0,30 m a 0,40 m de diâmetro e 1,15 m de altura, construídas sobre um bloco

de betão com cerca de 1,20 m de aresta dotados de peças de centragem forçada (figura 3.3). De modo a evitar possíveis movimentos devido à exposição solar durante as operações de medição estas peças são envolvidas por uma manilha exterior, de maneira a formar uma caixa de ar, com 0,03 a 0,05 m, devendo estar pintado com uma tinta branca;

- **Pontos auxiliares** são acrescentados ao sistema de maneira a melhorar a respectiva configuração geométrica, sendo materializados por pilares análogos aos dos pontos de referência.

Os pontos podem ser ainda classificados, quanto à sua função operativa, em:

- **Pontos alvo**, que servem exclusivamente para serem visados; são materializados por alvos de pontaria (figura 3.1), por prismas (retro reflectores) (figura 3.2), ou por peças de centragem forçada (utilizam-se peças do tipo Wild, por serem de custo reduzido), chumbadas em pilaretes;

- **Pontos estação**, utilizados para estacionar equipamentos (taqueómetros, teodolitos), sendo por vezes utilizados para estacionar alvos ou primas, transformando-se assim em pontos alvo. Habitualmente os equipamentos são instalados, durante as campanhas, em peças de centragem forçada.



Figura 3.2- Prisma reflector (Silva Gomes, 2010)

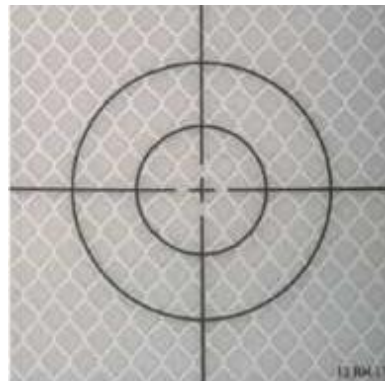


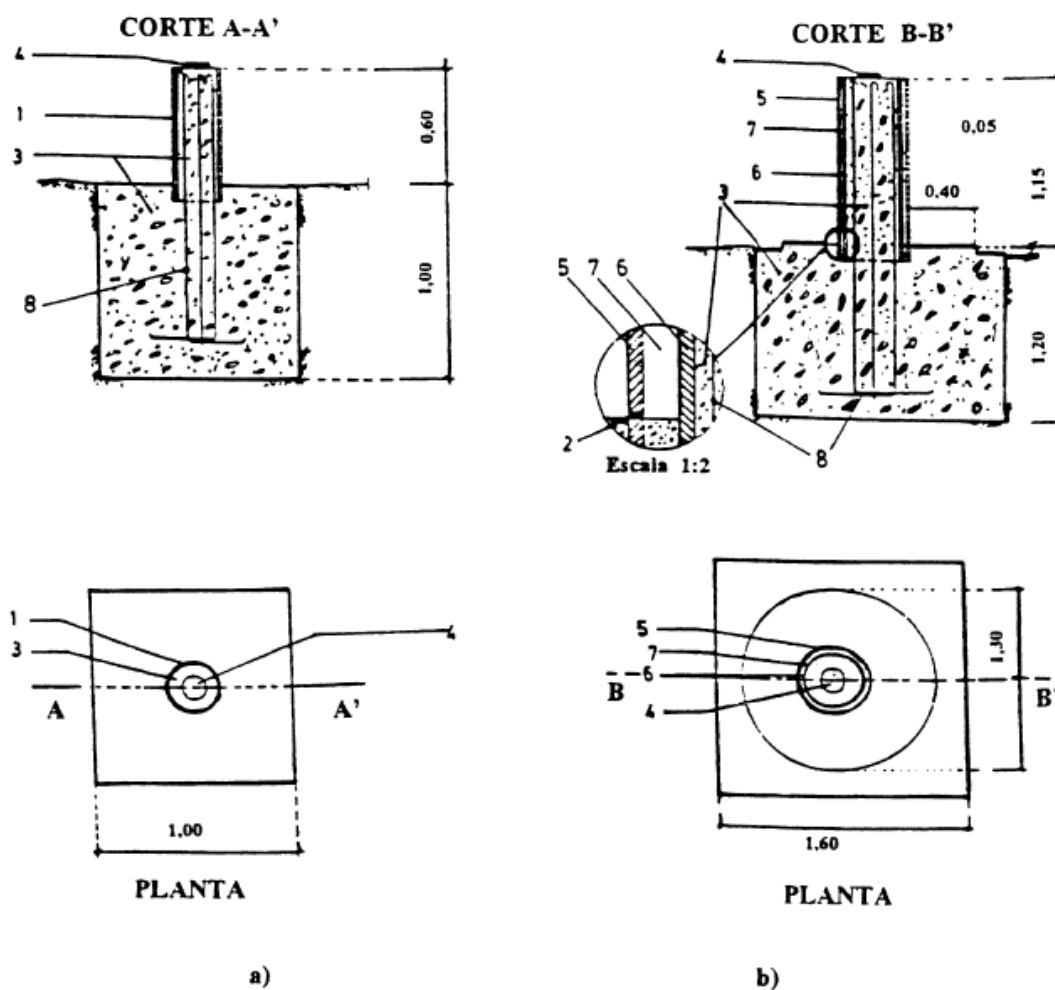
Figura 3.1- Alvo reflector (Silva Gomes, 2010)



Figura 3.3 - Peça de centragem forçada tipo Kern (Silva Gomes, 2010)



Figura 3.4 - Peça de centragem forçada tipo Wild (Silva Gomes, 2010)



- | | |
|--|---|
| 1- Manilha de fibrocimento de Φ interior 0,20 m | 5- Manilha de fibrocimento de Φ interior 0,40 m |
| 2- Dreno | 6- Manilha de fibrocimento de Φ exterior de 0,35 m |
| 3- Betão | 7- Caixa de ar com lâ de vidro |
| 4- Peça de centragem forçada de Φ 0,16 m | |

Figura 3.5 - Pontos de medida.
a) pilarete, ponto alvo; b) pilar para estacionamento de um equipamento de medição (ponto estação)
(Casaca *et al.*, adaptado de Catapirra, 1995)



Figura 3.6- Pilar de referência (também classificado como pilar de estacionamento)



Figura 3.7 – Pormenor da tampa de protecção do pilar de estacionamento



Figura 3.8 – Pilar de estacionamento (instalado na margem esquerda da barragem de Odelouca)



Figura 3.9 – Pilaretes instalados ao longo da banquetta do paramento de jusante



Figura 3.10 – Pormenor de peça de centragem forçada num pilarete



Figura 3.11 - Taco de nivelamento.

As peças de centragem forçada garantem o estacionamento dos equipamentos sempre no mesmo ponto do pilar.

Os pontos fixos devem ser fundados adequadamente, o que por vezes requer a intervenção de um geólogo e também a realização de sondagens ou poços de maneira a garantir a fixidez dos mesmos ao longo da vida da obra (Caspurro, 1999). Devem ser fundados em zonas não afectadas por movimentos. A sua localização deve ter ainda em conta aspectos ligados à configuração geométrica das redes de nivelamento, de triangulação e de alinhamento, de maneira a se obter uma maior precisão das medidas e uma boa visibilidade entre os pontos estação e os pontos alvo.

Nas grandes barragens de aterro as marcas superficiais para medição de deslocamentos verticais por nivelamento geométrico de precisão, de deslocamentos transversais por alinhamentos, ou de deslocamentos verticais e horizontais por triangulação, são instaladas em maciços de betão adequadamente solidarizados ao aterro subjacente.

As marcas de referência encontram-se instaladas em pilares devidamente solidarizados ao respectivo maciço de fundação ou directamente fixadas nesses maciços.

Na grande maioria das barragens sujeitas ao Regulamento de Segurança de Barragens, com destaque para as barragens de aterro, não existe qualquer instrumento ou dispositivo de observação. Contudo, no decorrer de inspecções realizadas no âmbito da avaliação da segurança de um conjunto de barragens de aterro portuguesas, tem sido identificada a presença de peças fixadas em blocos de enrocamento dos paramentos de montante e de jusante ou em pequenos maciços de betão. Nesta situação deve-se localizar as marcas de referência, que existirão, em princípio, nos encontros, bem como tentar localizar os elementos relativos a campanhas de observação contemporâneas da construção, do primeiro enchimento e do primeiro período de exploração.

A localização destas marcas e os elementos em arquivo permitirão retomar as observações, referindo-as a uma época de origem e assim determinar os deslocamentos sofridos pela estrutura desde essa época pelas referidas marcas.

A relevância dos resultados dos deslocamentos obtidos em relação à importância da obra depende da adopção da seguinte metodologia:

- estudo da distribuição das marcas superficiais pelo corpo da obra que permita a obtenção de uma informação razoável sobre a evolução da sua deformação superficial ao longo do tempo;
- selecção dos locais para implementação das marcas de referência de modo a que, do ponto de vista geológico, ofereçam adequadas garantias de fixidez e, do ponto de vista da engenharia geográfica, conformem o melhor possível a rede;

- materialização das marcas superficiais de modo a garantir-lhes uma vida útil o mais longa possível;
- realização periódica de novas campanhas de medição de deslocamentos (ou sempre que o conhecimento do estado de deformação da obra seja útil ou necessário, como é o caso, por exemplo, de variações importantes das solicitações principais) (Caspurro, 1999).

Após a verificação de que a estrutura se encontra em equilíbrio as campanhas periódicas de medição podem ser espaçadas (por exemplo, apenas de cinco em cinco anos), se não existirem indícios de comportamento anómalo.

A vantagem desta metodologia, relativamente à que corresponde à instalação de marcas apenas quando surgem indícios de comportamento anómalo, reside na impossibilidade de, neste caso, quantificar os deslocamentos já sofridos pela obra. Com a adopção deste procedimento é apenas possível seguir a evolução dos deslocamentos a partir da época em que a rede for utilizada pela primeira vez, perdendo-se assim o historial relativo aos deslocamentos.

Neste tipo de operação a precisão obtida depende, essencialmente, da configuração da rede, dos equipamentos utilizados e dos procedimentos adoptados.

Na medição de deslocamentos superficiais podem ocorrer alguns valores anómalos devido a variações dos parâmetros atmosféricos, tais como a temperatura, pressão e humidade, cujos efeitos podem ser minimizados efectuando leituras em períodos do dia adequados, tais como medições durante um período do dia com maior estabilidade de gradiente térmico atmosférico, ou seja, ao amanhecer. O equipamento de medição deverá sofrer um período de adaptação ambiental antes do início das operações de medição e durante as mesmas deve ser protegido da incidência solar directa. (Casaca *et al.*, 2005).

As figuras 3.13 e 3.14 mostram o primeiro sistema de observação geodésico instalado em barragens. Este sistema foi instalado na Barragem de Schräh no Vale Wagital, cerca de 40 km NE de Zurique (Suíça). Esta barragem de betão em gravidade foi construída em 1924, tem uma altura de 112 m e 156 de comprimento. Foram instalados 19 pontos objecto. As medições foram efectuadas a partir de três pontos referência (pontos estação).



Figura 3.12 - Barragem de Schräh (<http://www.flickr.com>)

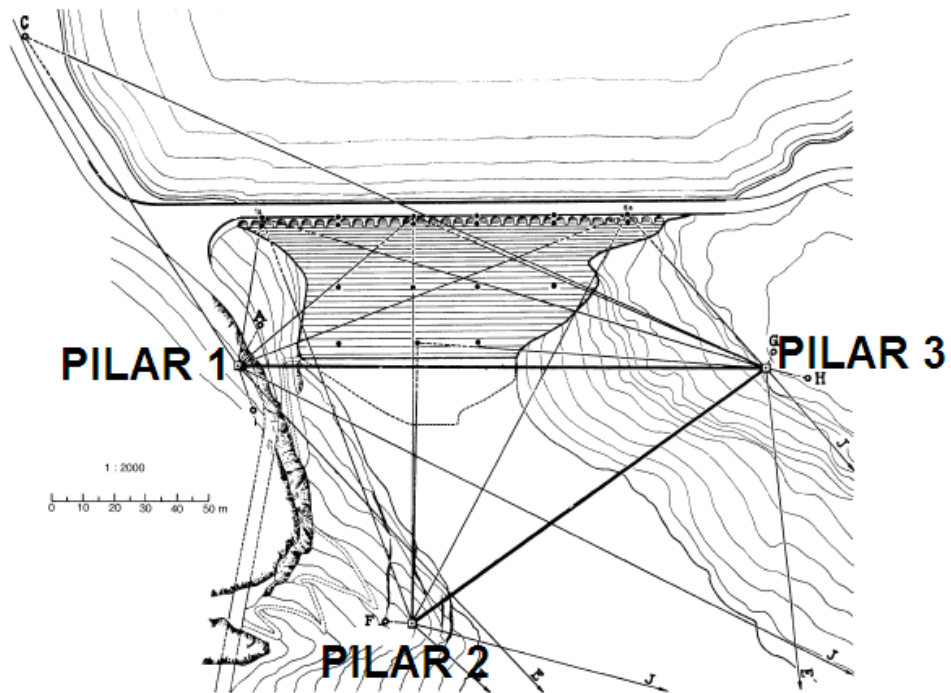


Figura 3.13 - Barragem de Schräh, exemplo de esquema de observação geodésico para a medição de ede deslocamentos (Rueger, 2006)

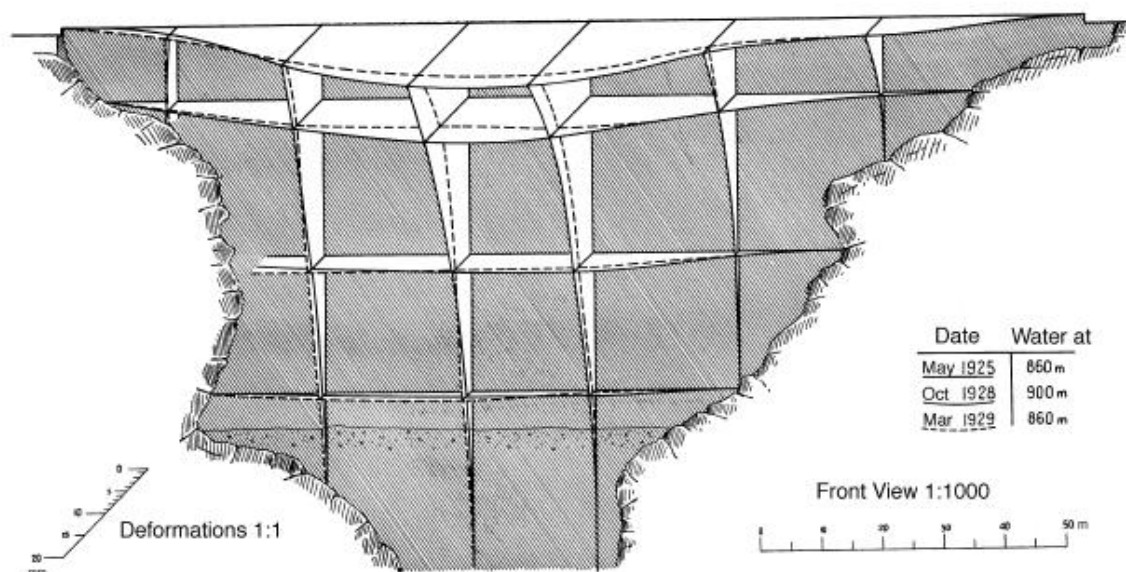


Figura 3.14 - Barragem de Schräh, modelo tri-dimensional das deformações (Rueger, 2006)

3.1.2. Triangulação

Este método consiste na medição de distância e de ângulos horizontais e verticais, de acordo com sequências e regras de operações previamente planeadas. Os valores obtidos são de seguida ajustados, validados e transformados em deslocamentos, com base em modelos matemáticos apropriados (Casaca *et al.*, 2005).

3.1.3. Trilateração

A trilateração é o processo de determinação, absoluta ou relativa, de pontos através de medições de distâncias, utilizando a geometria dos círculos, das esferas e dos triângulos. Ao contrário da triangulação, na trilateração não há medição de ângulos. A trilateração tem aplicações práticas na monitorização, incluído no sistema GNSS (Casaca *et al.*, 2005).

3.1.4. Poligonação

A poligonação é um método de determinação de ângulos azimutais e distâncias cartográficas.

Consiste numa sucessão de irradiações (medição de ângulos e distâncias a partir de um ponto), de modo a calcular sucessivamente as coordenadas de um ponto ($i+1$), ($i = 1, \dots, n-1$), utilizando relações planimétricas fundamentais.

Para se obter estas coordenadas utilizam-se estações totais, dois reflectores e acessórios, tais como tripés.

Este método permite resultados de grande qualidade quando se utilizam poligonais tridimensionais de precisão, no interior de galerias de visita (Casaca *et al.*, 2005).

3.1.5. Nivelamento

Este método é utilizado para a determinação da componente vertical dos deslocamentos. Este método utiliza o transporte de altitudes (ou cotas) a partir de um ponto de altitude conhecida (ou de cota arbitrada). Segundo Casaca *et al.* (2005) podem dividir-se em:

- a) Nivelamento trigonométrico ou nivelamento indirecto que, sendo um método relativamente expedito, é muitas vezes pouco preciso;
- b) nivelamento geométrico ou nivelamento directo, que embora mais trabalhos é um método mais preciso.

Mais recentemente começaram a ser utilizados outros métodos de nivelamento, baseados em radares ou sistemas de varrimento laser, estacionados em plataformas aéreas ou orbitais, que embora de precisão inferior aos métodos convencionais, permitem percorrer o terreno de forma contínua, com grande rapidez (Casaca *et al.*, 2005).

Segundo o mesmo autor o nivelamento geométrico de precisão permite controlar deslocamentos verticais situados no coroamento de uma barragem ou em galerias de inspecção, de uma grande barragem de betão, com erros inferiores a duas décimas de milímetro.

3.2. Equipamentos de observação

3.2.1. Teodolitos

Os teodolitos (figura 3.15) são utilizados para medição de ângulos verticais, geralmente zenitais e ângulos azimutais. É constituído por uma parte fixa, designada por base, e que permite solidariza-lo com um dispositivo de estacionamento sobre o terreno (um tripé ou um pilar de estacionamento) e uma parte móvel designada por alidade, que roda em torno de um eixo, o eixo principal perpendicular à base.



Figura 3.15 – Teodolito
(<http://www.manfra.com.br>)

Mais recentemente surgiram novos equipamentos – teodolitos electrónicos que relativamente aos modelos anteriores apresentam:

- a) sistemas óptico - electrónicos de leitura dos círculos azimutal e vertical;
- b) sistemas óptico - electrónicos para leitura de desvios angulares do eixo principal relativamente à direcção da vertical;
- c) sistemas de registo de leituras em suporte magnético compatível com o computador pessoal;
- d) um microprocessador, que controla os sistemas anteriores e regista as leituras azimutais e verticais, corrigidas do efeito do desvio da vertical referido (Casaca *et al.*, 2005).

3.2.2. Distanciómetro Electromagnético (DEM)

O seu princípio de funcionamento baseia-se na emissão, retroreflexão e recepção de ondas electromagnéticas, geralmente nas bandas do visível, infravermelha próxima e das microondas.

Mais recentemente, generalizou-se a utilização em topografia, das estações totais ou taqueómetros electrónicos, que são constituídos por um teodolito electrónico e DEM totalmente integrados, com partilha de sistemas ópticos, circuitos electrónicos, sistema de registos e baterias (Casaca *et al.*, 2005).



Figura 3.16 - Distanciómetro electromagnético Leica

3.2.3. Taqueómetro²

Um taqueómetro (figura 3.17) consiste, basicamente, num teodolito electrónico para a medição de ângulos verticais e horizontais que está equipado com um distanciómetro electrónico (DEM), que mede distâncias.

É utilizado para a medição de coordenadas tridimensionais.

Os valores medidos (distâncias e ângulos) são apresentados digitalmente e são, geralmente, transmitidos para um cartão de memória.



Figura 3.17 – Taqueómetro (<http://www.tocomlicius.com.br>)

Os equipamentos mais avançados vêm equipados com servomotores para posicionar o telescópio nos alvos e combinado com um reconhecimento automático de alvos permitem apontar de uma forma muito precisa no centro dos alvos reflectores (primas) (Naterop, 2002).

Nos últimos anos as estações totais têm sido muito utilizadas para a monitorização automática de deformações e de deslocamentos em geotecnia e em outros projectos de engenharia civil. Algumas das aplicações são (Naterop, 2002):

- monitorização de estruturas adjacentes de túneis em construção;
- medição de deformações de eclusas;
- monitorização das deformações das paredes de uma grande escavação;
- monitorização de movimentos de terrenos;
- observação de barragens.

Um exemplo da utilização de estações totais para a observação de deslocamentos superficiais é o caso do prolongamento do túnel da linha azul do Metro de Lisboa, que atravessa uma camada lódica do Rio Tejo.

Devido à natureza da camada atravessada pelo túnel foi necessário proceder-se a operações de melhoramento de terrenos, com recurso à técnica do *jet-grouting*. Durante as

² Também designado por estação total.

operações ocorreu um incidente, que provocou a inundação de uma secção do túnel. Devido a este facto foi necessário proceder a operações de reparação. Assim, foi decido monitorizar os deslocamentos da secção inundada antes, durante e após as operações de reparação.

Do ponto de vista da observação de deslocamentos, foi concebido um sistema de observação automatizado constituído por quatro estações totais e o respectivo software.

O sistema consistia em quatro tipos de pontos: pontos de apoio (estáveis e materializados em sistemas de referência), pontos estação (onde se estaciona a estação total), pontos de passagem (materializados por prismas de 360°) e pontos objecto (materializados por prismas colocados em pontos representativos do objecto a estudar). Apenas os pontos de apoio são colocados fora da secção monitorizada do túnel (figura 3.18).

Em anéis específicos do túnel foram instalados grupos de três pontos objecto (na parte interior, superior e exterior do anel) cujas coordenadas são calculadas por quatro estações totais sem redundância.

O túnel foi monitorizado a cada seis horas durante nove meses. Os resultados não ajustados mostram uma tendência consistente no sentido da parte interior do túnel. Os resultados ajustados confirmam que não houve movimentos significativos durante aquele período, o que está em concordância com o facto de nenhum trabalho de reparação ter sido efectuado até à altura.

Quatro estações totais e respectivo software foram utilizadas para observar um total de 60 pontos, dos quais 12 eram pontos passagem, materializados por prismas de 360°, sendo os restantes sido materializados por alvos reflectores normais. O número de pontos aumentou depois dos comboios entrarem em circulação (Berberan *et al.*, 2007).

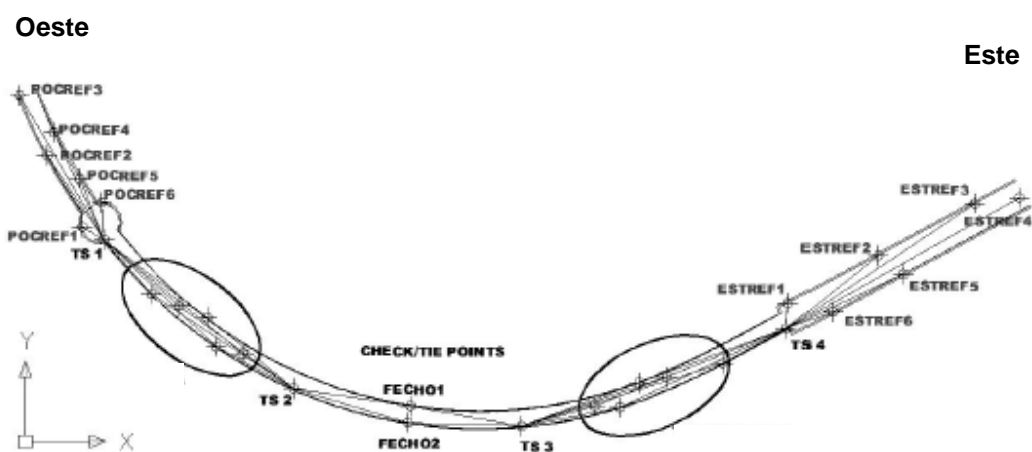


Figura 3.18 - Redes de monitorização Este e Oeste: pontos de controlo, pontos verificação, pontos de passagem e pontos estação (Berberan *et al.*, 2007)

Outro exemplo da utilização de estações totais na observação de deslocamentos em obras geotécnicas verificou-se na monitorização do reservatório de água da EPAL situado do Alto Lumiar. Foi necessário observar este reservatório devido às obras de alargamento do eixo rodoviário Norte-Sul e que implicava a realização de uma escavação junto ao mesmo, e a construção de dois muros de suporte para a estabilização do talude e do reservatório, o que poderia colocar em causa a segurança do reservatório e afectar o normal funcionamento de abastecimento de água à população.

A monitorização teve início em Abril de 2005 com uma frequência de leituras diária, passando a bi-diária na etapa em que os deslocamentos se tornaram mais significativos. Progressivamente a frequência foi diminuindo de acordo com a finalização dos trabalhos junto ao reservatório, tendo o sistema sido observado pela última vez em 8 de Janeiro de 2007.

O sistema de monitorização topográfica instalado era composto pelo subsistema de determinação de deslocamentos verticais e pelo subsistema de deslocamentos horizontais, que foi posteriormente complementado por um conjunto de instrumentos de monitorização geotécnica.

Para a determinação dos deslocamentos horizontais foram instalados sete pontos objecto, quatro pontos estação, três em pilar e um em tripé e cinco pontos de referência.

Os pontos objecto foram materializados por alvos de reflexão prismática e por mini prismas amovíveis.

Foram utilizados cinco pontos referência seleccionados e materializados por alvos em edifícios suficientemente afastados da área a monitorizar de modo a poderem ser considerados estáveis. A medição de ângulos e distâncias foi efectuada com recurso a uma estação total (Henriques *et al.*, 2008).

Para a determinação de deslocamentos verticais foram instalados cinco pontos referência e 13 pontos objecto. Foi utilizado o método de nivelamento geométrico. Todos os pontos foram materializados através de marcas de nivelamento cravadas com resina Epoxy de dois componentes, em estruturas existentes (lancis, estruturas de betão, etc.). Como instrumento de medida foi utilizado um nível digital Leica e miras de código de barras.

O sistema de observação foi projectado de modo a permitir leituras cruzadas entre pontos, aumentando a redundância e melhorando as precisões. A precisão associada à determinação dos deslocamentos verticais foi de 0,3 mm.

3.2.4. Nível óptico

O nível óptico é constituído, à semelhança do teodolito, por uma base e por uma alidade.

A base apresenta um nível esférico e parafusos nivelantes. A alidade é constituída, essencialmente, por uma nivela tórica de precisão, solidária com uma luneta de pontaria cuja linha de colimação se pretende horizontal. A alidade roda em torno do eixo principal e não tem eixo secundário, pois o objectivo deste equipamento é proporcionar pontarias ópticas.

Em cada pontaria a horizontalidade é assegurada pela nivela tórica.

A necessidade de, em cada pontaria óptica, se proceder à horizontalização manual da linha de colimação ser um processo demorado, fez com que no final da década de 60 se desenvolvesse um nível óptico automático (Casaca *et al.*, 2005).

3.3. GNSS (*Global Navigation Satellite System*)

O GNSS é um sistema de posicionamento e navegação que recorre à constelação de satélites norte-americanos *Global Positioning System* (GPS), aos satélites russos que formam o *Global Navigatsionnaya Sputnikovaya* (GLONASS) o europeu Galileo, que ainda não se encontra completamente operacional e o chinês Compass. O modo de funcionamento destes quatro sistemas é muito semelhante e a sua utilização conjunta permite uma melhor cobertura mundial e melhores níveis de precisão e fiabilidade (adaptado de Lima *et al.*, 2008).

O GNSS tem diversas aplicações com diferentes níveis de precisão, estando estes dependentes de vários factores, nomeadamente do tipo de posicionamento, do equipamento e das metodologias de observação.

Quando as coordenadas são obtidas de uma forma relativa, ou seja, são obtidas em relação a um receptor GNSS de referência, e o processamento é efectuado com base na medição da fase das portadoras dos sinais emitidos pelos satélites, em vez da medição do tempo gasto a percorrer a trajectória satélite – antena, consegue-se obter uma precisão milimétrica, compatível com a exigência que é colocada no controlo de segurança da maioria das obras de engenharia.

O sistema GNSS consiste em três segmentos distintos: o segmento espacial (constelação de satélites), o segmento de controlo operacional (estações receptoras) e o segmento do receptor (hardware e software utilizados para processar os sinais do satélite):

- i) segmento espacial consiste no conjunto dos satélites que suportam o sistema e o sinal rádio que emitem;

- ii) segmento de controlo operacional formado pelo conjunto de estações de controlo principais e estações de monitorização em todo o mundo. A informação obtida nas estações de monitorização que rastreiam os satélites é utilizada para os controlar e para prever as suas órbitas. Toda a informação obtida nestas estações é transmitida de volta à estação principal, onde é processada e analisada. Todas as anomalias, correcções de horários e outro tipo de informação são depois transmitidas para as estações de monitorização com antenas terrestres que depois enviam a informação para os satélites. A estação de controlo principal é ainda responsável pela gestão e controlo dos satélites do GNSS e da generalidade do segmento de controlo.
- iii) segmento do utilizador representa os equipamentos receptores com antena localizados na superfície terrestre, que processam o sinal enviado pelos satélites e registam a posição ou velocidade. A maioria dos receptores GNSS processam este sinal de uma forma automática e em tempo real.

De acordo com Pereira e Veronez (2008) o posicionamento depende na determinação da posição de objectos que se podem encontrar estáticos ou em movimento, pode ainda ser realizado de maneira absoluta, relativa ou diferencial.

De seguida faz-se uma breve descrição dos quatro sistemas que constituem o GNSS:

O GPS nasce na década de 60 do século XX, nos Estados Unidos da América, fruto da corrida ao espaço e resulta da junção de dois programas militares, tendo sido tornado oficial pelo Ministério da Defesa dos EUA em Abril de 1973 (*U.S. Army Corps of Engineers*, 2003).

O posicionamento por GPS é um processo através do qual e por sinais enviados por satélites se consegue determinar posições tri-dimensionais em tempo real, independentemente das condições meteorológicas (Pereira e Veronez., 2008).

Actualmente o sistema GPS consiste numa constelação de cerca de 35 satélites distribuídos em seis níveis orbitais a uma altura média de 20 200 km, inclinados a 55° em relação à linha do equador. Esta configuração permite que pelo menos quatro satélites estejam visíveis simultaneamente em qualquer ponto do planeta em qualquer instante (Pereira e Veronez, 2008).

O sinal é medido entre a antena receptora e pelo menos quatro satélites visíveis, e a posição é determinada com base na medição da fase portadora dos sinais emitidos pelos satélites.

Os erros mais comuns associados ao sistema GPS estão relacionados com os erros dos relógios receptores, erros provocados pela ionosfera e pela troposfera e os erros das órbitas dos satélites (dependendo da distância entre os dois receptores) (Lima *et al.*, 2008).

O GLONASS começou a ser desenvolvido pela antiga União Soviética a partir de 1982 e é um sistema muito semelhante ao GPS. É actualmente constituído por uma constelação de 24 satélites, duas portadoras com frequências semelhantes e 3 planos orbitais (com inclinação em relação ao plano equatorial de $64,8^\circ$), as orbitas distam da superfície terrestre cerca de 19 100 km. Após o final da guerra fria tem sido utilizado, essencialmente, como complemento do GPS, desde que os receptores sejam híbridos, ou seja, recebam simultaneamente sinais do GPS e do GLONASS (Lima *et al.*, 2008).

O sistema GALILEO é o sistema que a União Europeia tem em desenvolvimento, prevendo-se que venha a dispor de 30 satélites e portadoras com frequência semelhante às dos sistemas GPS e GLONASS. Ainda não se encontra completamente operacional, embora já haja no mercado receptores que permitem a utilização conjunta e simultânea destes três sistemas, beneficiando muito da melhor cobertura de satélites.

Sobre o sistema Compass, desenvolvido pela China, não se conseguiu obter informação do mesmo nível dos restantes, sabendo-se apenas que é constituído por 35 satélites.

As vantagens do GNSS estão associadas à fácil aquisição de dados, à grande precisão e à presente viabilidade económica.

As desvantagens associadas a todos estes sistemas e, por isso ao GNSS são os obstáculos que impedem os receptores de receber o sinal enviado pelos satélites, como é o caso da vegetação e das construções, o efeito multi-trajecto que consiste na reflexão do sinal nos objectos antes da sua recepção e os atrasos sofridos devido ao atravessamento da ionosfera.

O GNSS tem sido utilizado na monitorização de obras geotécnicas, para análise do seu comportamento estrutural, no qual são analisadas diferentes variáveis de controlo.

De seguida apresentam-se dois exemplos da utilização do GNSS na monitorização de barragens de aterro e de deslizamento de terrenos.

O primeiro exemplo é a barragem do Loureiro, situada no concelho de Portel e que pertence à Empresa de Desenvolvimento e Infra-estruturas do Alqueva (EDIA), integrada no Empreendimento de Fins Múltiplos de Alqueva.

É uma barragem de aterro, com 30 metros de altura, um coroamento de 1175 m e uma capacidade total de 7hm^3 .



Figura 3.19 - Barragem do Loureiro (<http://www.origens.pt>)

Neste tipo de obra é utilizado, geralmente, para a determinação de deslocamentos de pontos superficiais, métodos topográficos de precisão (Henriques *et al.*, 2008), e é composto por dois subsistemas. Um destinado a determinar os deslocamentos planimétricos e está materializado por peças de centragem forçada chumbadas no topo de pilaretes e pilares, onde também é possível instalar antenas GNSS. O outro subsistema consiste na determinação de deslocamentos altimétricos de pontos objecto.

Uma vez que se verificavam boas condições de visibilidade para os satélites fez-se um estudo comparativo. Os resultados obtidos pelos dois métodos, permitiram avaliar a incerteza de medição por GNSS e aplicabilidade deste método na observação de barragens de aterro.

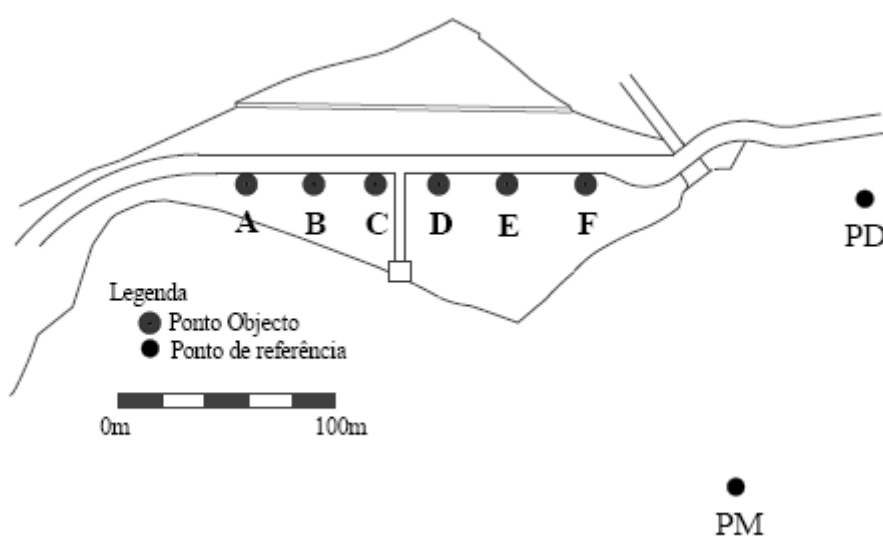


Figura 3.20 - Barragem do Loureiro. Localização dos pontos objecto e pontos de referência (Henriques *et al.*, 2008)

Cada campanha de observação teve a duração de um dia, tendo as observações planimétricas sido efectuadas próximo do pôr-do-sol, as altimétricas durante o dia, e as medições com o GNSS em simultâneo com as restantes.

Um dos receptores permaneceu estacionado num dos pilares de referência, enquanto um segundo receptor percorria os restantes pontos.

Nos pontos objecto o receptor esteve posicionado durante 5 minutos e nos pontos de referência um mínimo de uma hora.

Repetiu-se este processo com um dos receptores estacionado no segundo pilar de referência.

Os dados obtidos foram processados e calcularam-se deslocamentos horizontais (taqueometria), deslocamentos verticais (nivelamento geométrico) e deslocamentos tridimensionais (GNSS).

Foram realizadas 3 campanhas: a primeira antes do primeiro enchimento (Fevereiro de 2006), a segunda em Junho de 2006 e a terceira durante o primeiro patamar de enchimento (Setembro de 2006). De realçar que em todas as campanhas foram utilizados os mesmos equipamentos e as mesmas metodologias de observação, de maneira a minorar os erros.

Depois de analisados e comparados os resultados conclui-se que o GNSS utilizado em posicionamento relativo e em sessões de curta duração pode ter precisão suficiente para a determinação de deslocamentos superficiais em obras deste tipo.

Outro exemplo da aplicação do GNSS na monitorização é o caso de um deslizamento de terrenos em Assini, na Umbria (Centro de Itália).

A área afectada fica localizada num talude com cerca de 21% de inclinação, onde não foram detectados quaisquer movimentos aquando das primeiras construções, embora não se tenha efectuado prospecção em profundidade.

A urbanização da área provocou mudanças relevantes no fluxo das águas superficiais, desviando e em alguns casos fechando valas e ribeiras. Os primeiros indícios do deslizamento de terreno apareceram por volta de 1970, na forma de danos em edifícios (inicialmente atribuídos a deficiências na fundação), no pavimento das ruas, em muros de contenção e nas condutas.

Após a realização de estudos geológico-geotécnicos, chegou-se à conclusão que a área estava a ser afectada por um deslizamento de terreno, com uma extensão de 50 ha, classificado como um movimento gravitacional, com uma profundidade média nas dezenas de metros, sendo a profundidade máxima estimada nos 60 metros.

Embora com uma velocidade lenta (cerca de 1 cm/ano) a acumulação de deformações durante 60 anos provocou danos consideráveis em edifícios, estradas e infra-estruturas.

O deslizamento estava a ser monitorizado desde os anos 1970-1980 utilizando métodos de observação de pontos internos (inclinómetros, piezómetros, etc.) e por métodos geodésicos convencionais (teodolitos, estações totais).

A Universidade de Perugia estabeleceu no local, em 1995 (figura 3.21), uma rede de monitorização de GPS e a partir de 1999 foi integrado o sistema de monitorização GNSS acrescentando assim uma rede de posicionamento precisa, medida com equipamentos digitais, de maneira a refinar a determinação da altitude dos deslocamentos e densificar o número de pontos de controlo da área do deslizamento, para uma melhor percepção dos movimentos de terrenos (figura 3.22).

Aquando da instalação da rede GPS na área do deslizamento, esta ainda não era uma técnica muito utilizada na Itália para a monitorização de deformações, por isso a observação foi orientada para as seguintes finalidades:

- instalar um sistema moderno, com custos razoáveis para a monitorização de deslocamentos em deslizamentos de terrenos;
- testar a exactidão efectiva alcançável num posicionamento com uma rede local de GPS.

A rede instalada em 1995 consistia em seis pontos de referência, localizados em locais que do ponto de vista geológico fossem estáveis e 14 pontos de controlo localizados na área interessada à observação. A primeira monitorização efectuada com este sistema realizou-se em Maio de 1995. Outras campanhas de posicionamento foram efectuadas com a mesma rede de observação em Julho de 1996, Maio de 1997, Outubro de 1997, Outubro de 1998 e Setembro de 2001.

Em 2006 foi densificada a rede de observação e foram acrescentados 16 novos pontos de controlo, de maneira a se obter mais informação acerca dos movimentos de terrenos e para substituição de alguns pontos que sofreram estragos ao longo dos anos.

O sistema de observação ficou ao todo com 28 pontos de controlo, adicionais aos cinco pontos de referência. Foram efectuadas leituras em Maio de 2006, Maio de 2007 e Novembro de 2008. Mais duas campanhas parciais foram realizadas em Maio 2009 e Abril de 2010, envolvendo apenas parte dos pontos de controlo (Fastellini *et al.*, 2010).

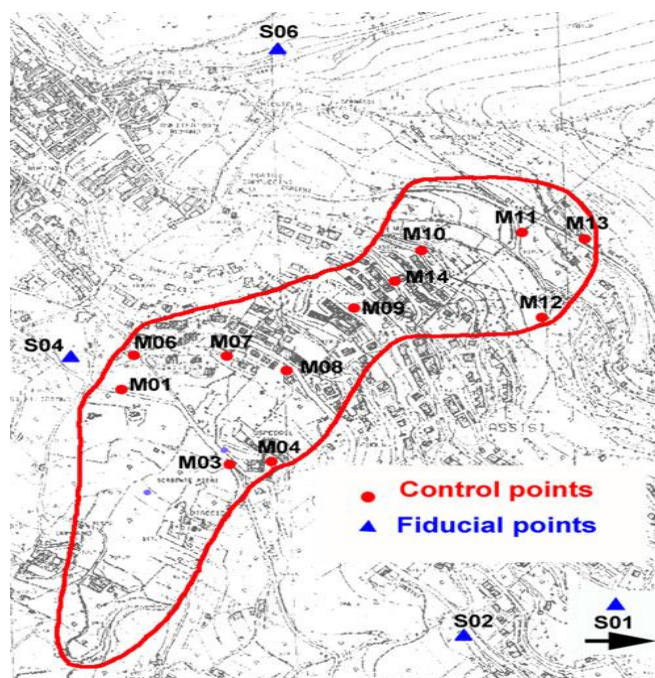


Figura 3.21 – Rede GPS de Assisi – configuração original de 1995 (Fastellini *et al.*, 2010).

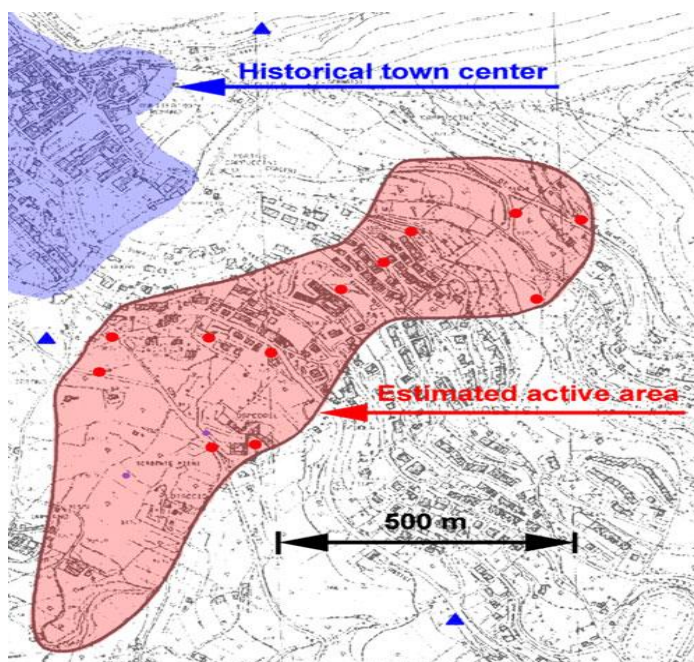


Figura 3.22 – Localização e fronteiras estimadas do deslizamento de terrenos – os triângulos e os círculos representam os pontos de referência e de controle, respectivamente (Fastellini *et al.*, 2010).

3.4. Varrimento laser

O método de varrimento laser teve a sua origem nos Estados Unidos da América, em 1957, quando um aluno da Universidade de Columbia chamado Gordon Gould descreveu os princípios dos raios laser.

Em 1960 a tentativa de construção do laser foi conseguida e após cinco décadas de aperfeiçoamento centenas de tipos de laser foram concebidos para as mais diversas aplicações como solda, cirurgia óptica ou para o *Geodetic Laser Scanning* (GLS).

O GLS é o único tipo de laser que interessa focar no âmbito deste trabalho e tem como base de funcionamento o envio de radiação electromagnética por parte de um laser óptico sobre a superfície a ser topografada. O vector obtido por cada impulso reflectido é adicionado à posição e orientação instantânea do dispositivo GLS de modo a se obter as coordenadas cartesianas de um ponto da superfície reflectida (Carter *et al.*, 2007).

As observações com o GLS podem ser efectuadas de um ponto fixo na Terra ou de um veículo em movimento. Os detalhes do instrumento dependem de factores como a energia do impulso, número de impulsos por segundo, do desenho do scanner, e o tipo de sensor que pode ser para um ponto fixo na Terra, veículo aéreo ou de satélite, sendo o princípio de funcionamento comum para todos.

O GLS pode ter três princípios de funcionamento:

- a) diferença de fase;
- b) *Time Of Flight* (TOF);
- c) triangulação.

Para obras da dimensão de barragens o método apropriado é o TOF. Este tipo de laser mede a distância a um ponto objecto utilizando um laser que emite radiação electromagnética e medindo o tempo entre a emissão da radiação e a detecção do sinal reflectido. Este método é menos preciso e menos rápido mas tem um maior alcance, comparativamente aos lasers que utilizam a diferença de fase como método de funcionamento.

Os laser que têm a diferença de fase como princípio de funcionamento utilizam a mudança de fase entre a onda transmitida e reflectida como método para calcular a distância ao ponto objecto (Berberan *et al.*, 2011).

Este equipamento é constituído por uma cabeça motorizada rotativa (de eixo vertical) que combina com um espelho rotativo (de eixo horizontal), sendo que ambas as rotações têm medidores angulares de alta precisão.

A combinação dos componentes do equipamento permitem efectuar um varrimento de feixe de laser no plano horizontal de 360° e, ao longo deste, um varrimento de abertura vertical de 90°. Os medidores angulares e a distância dada pelo tempo de ida e de volta da onda electromagnética permitem coordenar cada ponto que reflecte a referida emissão a uma cadência de 12 000 pontos por segundos (Riegel, 2011).

O varrimento laser permite observar deformações com um grau de incerteza que pode atingir os poucos milímetros. A incerteza vai depender das especificações do equipamento, dos procedimentos operacionais e computacionais, dos acessórios, da configuração da

instalação, das propriedades ópticas das superfícies reflectoras e das competências profissionais dos operadores.

Durante o tempo de vida útil da obra são efectuadas inúmeras inspecções visuais, das quais resulta uma grande variedade de documentos e de informação para analisar. Para além disto, as inspecções visuais tradicionais não estão preparadas para serem processadas electronicamente, mesmo quando são recolhidas em formato electrónico. Com a utilização de um sistema, que combina um laser e uma máquina fotográfica é possível adquirir informação das inspecções visuais, registá-la e processá-la electronicamente com uma qualidade métrica e com qualidade e fiabilidade, podendo tornar os sistemas de informação geográfica importantes no controlo de segurança de alguns tipos de obra geotécnicas, como é o caso das barragens.

Um exemplo de aplicação do método do varrimento de laser em Portugal foi a sua utilização na barragem do Lapão. A barragem do Lapão é uma barragem de terra, com uma altura de 39 metros e com um desenvolvimento no coroamento de 97 metros, integrada no Aproveitamento Hidroagrícola das Ribeiras de Fraga e Mortágua.



Figura 3.23 - Barragem do Lapão

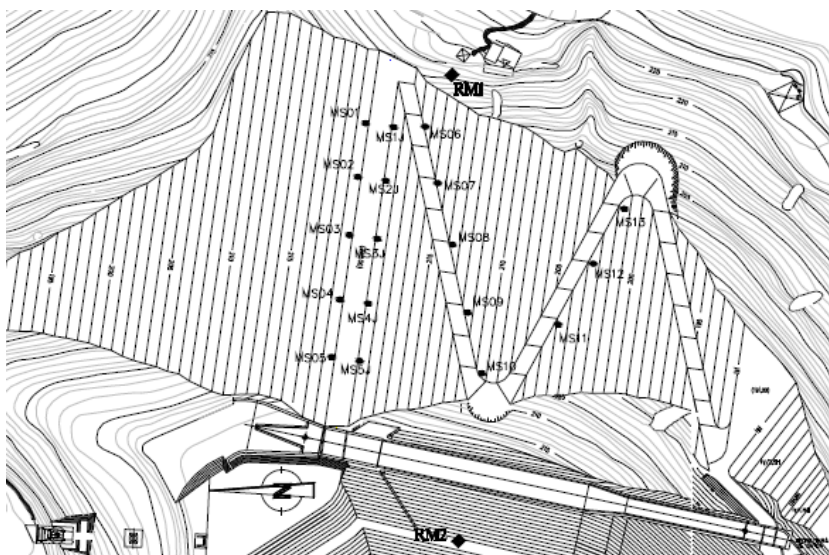


Figura 3.24 - Barragem do Lapão – Localização das marcas superficiais (MS) e das estações referência (RM) (Berberan *et al.* 2011)

No inverno de 2002/2003 esta barragem encontrava-se numa situação de emergência. Durante o primeiro enchimento, no inverno de 2001/2002 a barragem sofreu grandes deslocamentos, demonstrando assim um comportamento deficiente. Em Dezembro de 2002 e, após grande precipitação, a barragem atingiu o nível de pleno armazenamento, sofrendo novamente grandes deslocamentos. A taxa de assentamentos chegou a atingir 15 mm/dia durante o inverno de 2002/2003.

Depois de um esvaziamento da albufeira em Fevereiro de 2003 foram efectuadas diversas campanhas de observação, incluindo uma em Março de 2003 com recurso a um laser scanner 3D. Em Fevereiro de 2005 e após a reabilitação da barragem foi efectuada nova campanha utilizando o laser scanner 3D.

Em Julho de 2007 as marcas superficiais foram observadas a partir dos pontos de referência com uma estação total. Os pontos objecto foram materializados com alvos retro-reflectores que podem ser utilizados quer pela estação total, quer pelo laser scanner.

Este sistema utiliza o método de referência indirecto, o que significa que se baseia num conjunto de pontos referência bem distribuídos, materializados por retro-reflectores cujas coordenadas foram determinadas através de estações totais. Os pontos passagem são medidos apenas pelo laser scanner e são utilizados para fortalecer a geometria do encadeamento da nuvem de pontos. Em 2003 foram utilizadas quatro posições e foram utilizados 21 reflectores, nove deles como pontos de controlo e 12 como pontos de passagem. Em 2005 foi observada uma área maior recorrendo a sete posições com o laser scanner utilizando 15 retro-reflectores, sete pontos de controlo e oito pontos de passagem. Na campanha realizada em Julho de 2007 foram realizadas observações em três posições com o laser scanner e com um total de 27 retro-reflectores, incluindo 18 marcas superficiais.

De acordo com a observação da barragem do Lapão e outros trabalhos pode-se concluir, até à data, que a incerteza associada à utilização do laser scanner é inferior ao centímetro o que é aceitável para a observação de barragens de terra.

Outra das possíveis aplicações do varrimento laser é a sua utilização para as inspecções visuais. A barragem do Cabril que, para além da observação realizada socorrendo-se do varrimento laser, também foi sujeita a inspecções visuais recorrendo a uma máquina fotográfica acoplada ao laser scanner. Foi utilizada ainda uma máquina fotográfica com maior resolução, que não podia ser acoplada ao laser scanner, de modo a atingir uma resolução que permite identificar fendas com 1 mm de espessura.

Conclui-se assim que o GLS, combinado com a imagem digital pode ser utilizado na observação de deformações com marcas superficiais, assim como a observação da deformação de todas as superfícies visíveis da estrutura e da sua vizinhança, atingindo incertezas que são aceitáveis para o tipo de estruturas em estudo.

A informação adquirida com este processo tem uma melhor qualidade em termos posicionais, cronológicos, precisão e de objectividade e com menos custos de aquisição. Os resultados são gravados e processados online e ficam prontos para migrar para outras aplicações de software e, em caso de emergência, são rapidamente enviados via intranet ou internet para o Dono de Obra, consultores, empreiteiros, fiscalização, autoridades e projectista. Para além disso, a evolução da análise da informação recolhida durante as inspecções visuais assistidas permitem um melhor e mais fácil controlo da segurança em barragens (Berberan *et al.*, 2011).

3.5. Fotogrametria

A fotogrametria é a disciplina que se ocupa da medição, análise e interpretação de “fotogramas” com vista à classificação e determinação da posição e dimensões “reais” dos objectos neles representados (Casaca *et al.*, 2005).

Geralmente a fotogrametria fornece precisões na ordem 0,001% e 0,015% da trajectória do voo acima do solo das coordenadas horizontais e verticais, respectivamente.

Este método é oneroso e, geralmente não oferece a precisão suficiente para a monitorização de barragens, sendo no entanto ideal para a observação de movimentos de terrenos nas imediações da barragem. Para precisões na ordem do centímetro é necessária a instalação de marcas, enquanto se as precisões requeridas forem na ordem dos decímetros não é necessário instalar marcas. Naturalmente tem que haver algumas marcas de referência instaladas. Um exemplo da utilização da fotogrametria na observação de barragens é a barragem de Chichester, localizada no Rio Williams, Austrália. Tem um coroamento de 254 metros e uma altura de 43 metros. Foram alcançadas precisões de ± 3 -8 mm em todos os componentes das coordenadas dos pontos objecto (Rueger, 2006).

4. Metodologias de medição de deslocamentos internos

Os deslocamentos internos consistem na medição de deslocamentos de referências visualmente inacessíveis, colocadas no interior de aterros, de taludes, maciços de fundação de estruturas, etc..

Podem ser de dois tipos, verticais e horizontais. Para cada um dos casos utilizam-se diferentes dispositivos, salvo em alguns casos, em que o mesmo dispositivo tem a capacidade de medir deslocamentos horizontais e verticais.

4.1. Generalidades

Um dos aspectos que é necessário clarificar é a distinção entre a exactidão e a precisão.

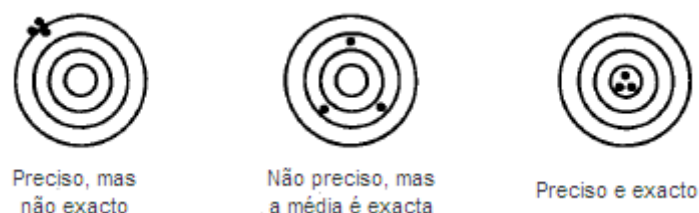


Figura 4.1- Precisão e exactidão (Dunnicliff, 1988)

A exactidão é a aproximação do valor real da grandeza medida. É sinónimo do *grau de correcção*. A exactidão de um instrumento é avaliada durante a sua calibração, quando o valor real é o valor indicado no instrumento cuja exactidão está a ser verificada.

A exactidão expressa-se por \pm um número. Por exemplo uma exactidão de ± 1 mm significa que o valor medido está dentro de um limite de 1 mm do valor real.

A precisão é a aproximação entre valores de medições semelhantes. A precisão é sinónima de reprodutibilidade e de repetibilidade.

A precisão expressa-se em \pm um número. O número de algarismos significativos reflecte a precisão das medições, assim $\pm 1,00$ reflecte uma maior precisão do que $\pm 1,0$. Medições efectuadas devem reflectir a precisão do instrumento utilizado (Dunnicliff, 1988).

A escolha dos equipamentos deve ter atenção as seguintes características: sensibilidade, precisão, campo de leitura, estabilidade, robustez, tempo de resposta, efeito do meio e a garantia das leituras e ter ainda em consideração os seguintes factores: manutenção, compatibilidade com as técnicas construtivas e o custo (Sêco e Pinto, 2000).

A instalação dos equipamentos é outro passo em que é necessário ter especial atenção. Embora os fabricantes dos equipamentos forneçam manuais para a instalação há que ter em atenção as características específicas do local onde se vai instalar o equipamento. Assim deve ser realizado um planeamento prévio flexível que contemple possíveis situações imprevistas durante a instalação, como é o caso das condições geotécnicas dos terrenos. Deve ser feita ainda uma verificação das curvas de calibração dos equipamentos.

Actualmente, já é possível, a aquisição de dados automaticamente o que permite a leitura simultânea de um grande número de equipamentos com uma elevada frequência. Resolver problemas relacionados com a recolha de dados nas épocas de inverno e a redução de pessoal de campo. Mas tem contrapartidas, tais como, o aumento da complexidade devido à instalação de sensores eléctricos, uma maior familiarização por parte dos engenheiros dos aspectos electrónicos das novas tecnologias, efeitos detrimenais resultantes das faltas de energia, custos mais elevados e a possibilidade de destruição do equipamento na ocorrência de um sismo ou de uma cheia (Sêco e Pinto, 2000).

Segundo Silva Gomes (2002) para cada tipo de grandeza a observar existe no mercado uma vasta gama de equipamentos cuja selecção depende de vários factores, dos quais se destacam:

- a) fiabilidade;
- b) exactidão, em função da variação previsível da grandeza e da capacidade de análise das suas mais pequenas variações;
- c) campo de medida, compatível com as máximas variações previsíveis;
- d) robustez;
- e) durabilidade;
- f) perturbação introduzida no meio;
- g) perturbação introduzida no processo construtivo;
- h) custo dos equipamentos, das unidades de leitura associadas e da respectiva manutenção;
- i) taxa de sucesso ou insucesso da aplicação de equipamentos análogos em obras antecedentes;
- j) disponibilidade no mercado;
- k) existência de unidades de leitura em utilização noutras obras;
- l) possibilidade de automatização.

Segundo o mesmo autor, a opção pela automatização da observação de determinadas grandezas deve fundamentar-se na ponderação dos seguintes aspectos:

- é actualmente viável, com custos razoáveis, automatizar a aquisição de dados de determinadas grandezas, sequenciando essa automatização com o processamento, a validação e a análise preliminar dos resultados (análises mais detalhadas, eventualmente

seguidas de uma interpretação do comportamento, são possibilidades mais sofisticadas por utilização, nem sempre fácil, de sistemas periciais);

- as grandezas a automatizar devem ser as que se relacionam directamente com os factores que condicionam a segurança das obras; a possibilidade de dispor, praticamente em tempo real, de informação relacionada com as condições de segurança, constitui uma importante mais valia da observação;

- a transmissão automática dos valores das grandezas para centros devidamente apetrechados em recursos técnicos e humanos evita situações, correntes nos processos manuais, associadas à deficiente qualificação do pessoal encarregado das leituras de que podem resultar actuações tardias ou o não aproveitamento da conjugação de factores favoráveis para o esclarecimento de certas operações;

- a automatização das observações é particularmente recomendável para as grandezas obtidas em equipamentos instalados em locais de muito difícil acesso ou que possam representar riscos para o pessoal encarregado da sua exploração; a automatização pode também vir a revelar-se fundamental em caso de ocorrência de situações anómalas que ponham em risco a segurança dos trabalhadores e do pessoal encarregado de certas questões;

- a automatização das observações implica a utilização de equipamentos e acessórios em regra mais sensíveis e mais sofisticados, o que implica a adopção de protecções especiais e a necessidade de um conhecimento de especialidade por parte de técnicos encarregados da sua instalação e exploração;

- a obtenção de dados com uma grande frequência permite a realização de estudos que, com recolha manual, seriam impraticáveis ou excessivamente dispendiosos;

- a automatização gera um volume de informação em regra muito maior do que o que se refere à recolha manual; é, por isso, indispensável dispor de rotinas de processamento que permitam a emissão, também automática, de sinais de *atenção*, de *alerta* ou de *intervenção*;

- a existência de subsistemas automatizados deve ser objecto de validação pelo próprio sistema e, sempre que possível, de controlo mediante a realização periódica de leituras manuais de verificação (Silva Gomes, 2002).

De seguida apresenta-se uma descrição dos principais instrumentos utilizados na determinação de deslocamentos internos.

4.2. Inclínómetros

Este equipamento é largamente utilizado na medição de deslocamentos em aterros e suas estruturas de fundação, em deslizamentos de terrenos, barragens de aterro, paredes moldadas e túneis.

Os dados obtidos do aparelho referem-se a deslocamentos que se verificam na direcção perpendicular ao eixo do aparelho e incluem-se no grupo dos equipamentos utilizados na medição de deslocamentos horizontais porque é onde é mais utilizado, embora também se possa utilizar noutras situações.

Este equipamento divide-se em quatro partes fundamentais:

- um tubo, que é a única parte a instalar em permanência no solo ou no aterro. Geralmente de alumínio ou plástico e com secção transversal circular e ranhurada;
- uma sonda, que transporta um ou mais sensores;
- uma unidade de leitura e apresentação de dados;
- um cabo eléctrico graduado ao longo do seu comprimento que liga a sonda à unidade de leitura e que tem a função de transportar e localizar a sonda ao longo do tubo (Toco Emílio, 1991).

A constituição e princípio de funcionamento dos inclinómetros estão descritos na figura 4.2..

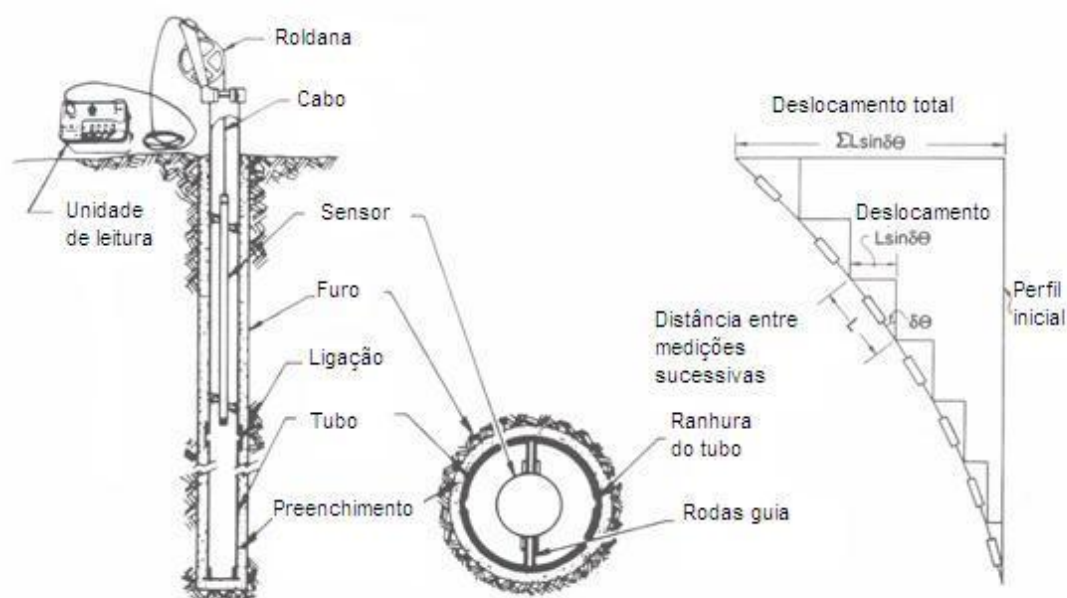


Figura 4.2 – Inclínómetro – Princípio de funcionamento (Dunnicliff, 1988)

O tubo inclinométrico é um tubo, geralmente de PVC, mas também os há em alumínio, com ranhuras e que pode ter diversos diâmetros.

O tubo inclinométrico (figura 4.3, figura 4.4 e figura 4.5) é instalado, geralmente em furos de sondagem, mas também pode ser embebido em aterros, em betão ou solidarizado a estruturas. À medida que se introduz o tubo no furo de sondagem é também introduzida uma calda de cimento de modo a solidarizar o tubo ao terreno. O tubo providencia o acesso da sonda inclinométrica às medições subsuperficiais. As ranhuras dentro do tubo controlam a orientação da sonda e providenciam uma superfície a partir da qual se obtém as repetidas medições da inclinação. Este dispositivo pode ser instalado numa posição vertical ou sub-vertical que atravessa a zona do suposto movimento, no caso dos sistemas verticais, ou é instalado na horizontal, no caso dos inclinómetros horizontais.

O tubo inclinométrico é desenvolvido para que acompanhe as deformações do terreno adjacente ou da estrutura à qual está solidarizado, a vida útil do tubo termina quando o movimento contínuo do terreno o aperta ou o deforma em demasia ao ponto de cortar o tubo, impedindo assim a passagem da sonda inclinométrica.

A escolha do diâmetro do tubo inclinométrico está relacionada com o tipo de obra a observar.

A *Slope Indicator*, por exemplo, apresenta 3 diâmetros diferentes:

- 85 mm (3.34") – adequado a movimentos de terreno e observações a longo prazo. É também adequado para a monitorização de zonas de cisalhamento múltiplo ou zonas de cisalhamento muito estreitas. É ainda o diâmetro usado no caso da utilização de sondas horizontais.

- 70 mm (2.75") – adequado para o caso de projectos de construção. Pode também ser instalado para o estudo de estabilidade de taludes quando apenas é esperado um grau de deformação pequeno. Utilizado em obras de médio – curto prazo.

- 48 mm (1.9") – é adequado a situações onde pequenas deformações são distribuídas em zonas amplas. Geralmente não é instalado em solos. É utilizado em rocha ou betão, onde são esperadas deformações pequenas.

Os tubos inclinométricos podem ser instalados antes, durante ou após a construção dos aterros, neste último caso em furos de sondagem. Nesta situação, assim como na instalação em solos não perturbados, os furos são abertos com diâmetro superior ao do tubo de maneira a permitir a solidarização deste material de base através do preenchimento do espaço compreendido entre o furo e o tubo. Os materiais para este efeito podem ser granulares ou caldas se o meio envolvente o permitir (Toco Emílio, 1991).

Quando são instalados durante a construção do aterro as boas práticas recomendam a colocação de materiais progressivamente mais finos nas imediações do equipamento e uma

compactação cuidada. Nas instalações verticais o tubo é acrescentado à medida que o aterro cresce.



Figura 4.3 - Tubo inclinométrico



Figura 4.4 - Secção do tubo inclinométrico



Figura 4.5 - Tubo inclinométrico instalado numa barragem

A instalação dos tubos inclinométricos antes, durante ou após a construção da obra apresenta vantagens e inconvenientes, para qualquer uma das situações.

As vantagens da instalação dos tubos inclinométricos antes da construção são a possibilidade de medir os deslocamentos devido às acções decorrentes da construção (caracterização de um estado de referência, avaliação dos efeitos da descompressão dos maciços durante as escavações, de injeções de compensação, etc.).

Os inconvenientes da instalação dos tubos inclinométricos antes da construção estão relacionados com a necessidade da sua protecção contra actos de vandalismo e os custos.

Se forem instalados durante a construção as vantagens são a possibilidade de efectuar medições de deslocamentos devidos às acções decorrentes da construção (acção do peso próprio e de eventuais sobrecargas), deslocamentos devido a forças impostas, por exemplo, ancoragens.

Os inconvenientes da instalação de tubos inclinométricos durante a construção estão relacionados com a eventual perturbação das actividades de construção – movimento de

equipamento e de pessoal, criação de zonas singulares em torno dos tubos inclinométricos devido a uma compactação deficiente, dificuldades na realização das leituras, danos irreversíveis nos tubos, etc..



Figura 4.6 - Barragem do Penedrão - instalação de um tubo inclinométrico durante a construção

A instalação dos tubos inclinométricos após a construção tem a vantagem de as operações se procederem sem perturbação das actividades construtivas, instalação mais controlada, possibilitando melhor desempenho na fase de serviço.

Os inconvenientes estão relacionados com a perda de informação eventualmente valiosa sobre o comportamento durante a fase de construção.

Uma sonda inclinométrica é constituída por um corpo de aço inoxidável, uma ligação para o cabo de controlo e dois pares de rodas.

Um dos acelerómetros mede a inclinação no eixo das rodas da sonda inclinométrica. Este é o eixo “A”. O outro acelerómetro mede as inclinações do eixo perpendicular às rodas – eixo “B”.

Quando a sonda é inclinada na direcção A0 ou B0 (ver figura 4.8) as leituras são positivas, quando a sonda é inclinada nas direcções A180 ou B180 as leituras são negativas.

Numa observação padrão com a sonda inclinométrica a sonda é puxada desde a base até ao topo do tubo inclinométrico duas vezes. Na primeira passagem as rodas superiores devem ser introduzidas na calha A0. Isto garante que os valores de deslocamentos sejam positivos (Slope Indicator, 2011).

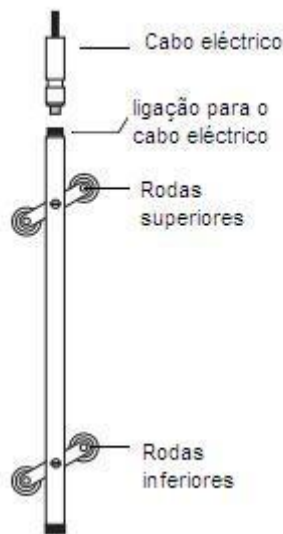


Figura 4.7 - Esquema de uma sonda inclinométrica (Slope Indicator, 2011)

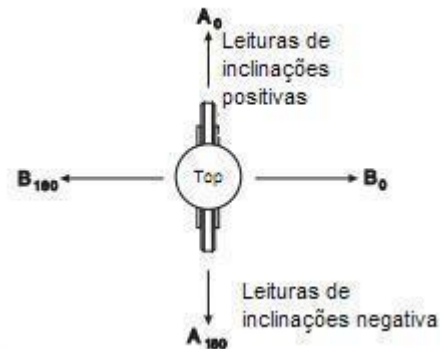


Figura 4.8 – Eixos para as leituras de inclinómetros (Slope Indicator, 2011)

As sondas inclinométricas classificam-se em:

- i) sub-verticais, com um campo de medida inferior a 30°;
- ii) sondas inclinadas, com ângulos superiores a 30°;
- iii) sondas horizontais e;
- iv) sondas *in place*.

O método de funcionamento baseia-se na actuação da força da gravidade sobre os sensores, e assim, independentemente do tipo de sonda inclinométrica todas elas incluem uma massa pendular, que pode ser de movimento livre ou constrangido (como por exemplo os que utilizam um acelerómetro servo-controlado, extensómetros colados no apoio pendular da massa ou cordas vibrantes).

No caso da massa pendular com movimento livre o sinal de saída é proporcional ao ângulo de desvio da massa relativamente à posição vertical.

No caso da massa pendular com o movimento constrangido medem-se os esforços induzidos no elemento sensível devido ao desvio da massa em relação à sua posição de equilíbrio relativamente à vertical do lugar (Toco Emílio, 1991).



Figura 4.9 - Sonda inclinométrica



Figura 4.10 - PDA e fixador.

A medição de deslocamentos processa-se da seguinte maneira: introduz-se a sonda no furo e por cada avanço de uma distância igual ao seu comprimento, L , faz-se uma leitura do sinal do sensor. Os dados obtidos não equivalem directamente aos deslocamentos. Mas, tendo em conta que a leitura realizada à maior profundidade é efectuada numa zona onde os deslocamentos são muito pequenos ou mesmo nulos, se se calcular os deslocamentos ao longo do tubo relativamente aquele ponto, os valores que se obtém são muito próximos dos absolutos.

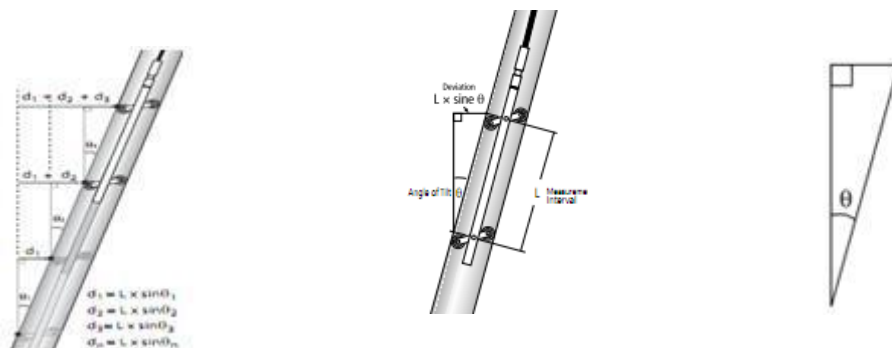


Figura 4.11 - Esquema da sonda inclinométrica com o princípio de cálculo dos deslocamentos (Slope Indicator, 2011)

Pelo esquema da figura 4.11 percebe-se que o deslocamento horizontal, em qualquer ponto, obtém-se através da multiplicação do comprimento da sonda pelo somatório dos senos dos ângulos medidos desde a maior profundidade até ao ponto considerado. Existindo dois conjuntos de valores que correspondem aos dois eixos sensíveis da sonda obtém-se as duas componentes do deslocamento, num plano horizontal. Como o inclinómetro é um sensor de verticalidade verdadeira, estes deslocamentos são desvios em relação à vertical do ponto situado a maior profundidade. Os deslocamentos efectivos correspondem à diferença entre os valores medidos em relação aos valores obtidos da primeira campanha de leituras (leitura de referência).

De salientar que a ocorrência de um erro na leitura de um ponto afecta todos os valores situados a jusante no processo de cálculo, uma vez que a medição do deslocamento é feito de um modo indirecto, obtendo-se o valor do deslocamento através de um processo de cálculo.

Se em vez de serem instalados verticalmente, forem instalados com uma inclinação inicial superior a 30° (medição de deslocamentos em barragens com cortina a montante), ou mesmo na horizontal (medição de assentamentos) o cálculo dos deslocamentos processa-se da mesma maneira. Porém, devido às características próprias do equipamento, a sensibilidade dos sensores varia com a gama de medição, sendo esta máxima para os valores mais pequenos do ângulo.

As sondas instaladas horizontalmente são utilizadas para a obtenção de perfis de assentamentos ou de empolamento. As aplicações típicas incluem a monitorização de assentamentos ou de empolamentos em cavernas de armazenamento, aterros e barragens de aterro.

O tubo inclinométrico é instalado num troço horizontal, que pode estar aberto nas duas extremidades (figura 4.12), ou fechado na que está mais distante (figura 4.13). Quando o tubo tem uma das extremidades fechadas são também instalados uma roldana e um cabo para retorno do sensor.

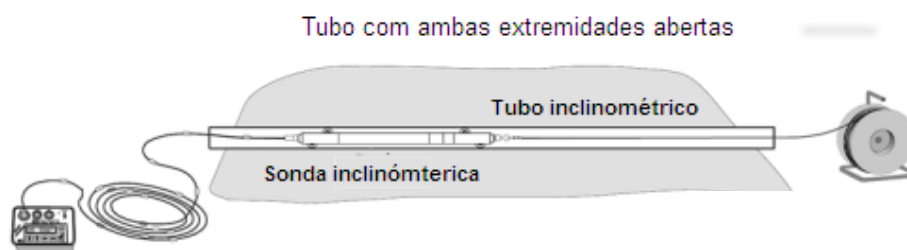


Figura 4.12 - Inclinómetro horizontal com as duas extremidades abertas (Slope Indicator 2011)



Figura 4.13- Inclinómetro horizontal com uma extremidade fechada (Slope Indicator, 2011)

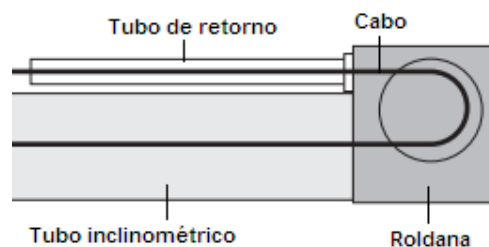


Figura 4.14 - Pormenor da extremidade fechada do inclinómetro (Slope Indicator, 2011)

As medições iniciais estabelecem o perfil do tubo inclinométrico e, as medições subsequentes irão revelar alterações nesse perfil, caso esteja a ocorrer movimento do terreno (Slope Indicator, 2011).

A sonda inclinométrica horizontal emprega um equilíbrio de forças servo-acelerómetro para medir a inclinação no plano das rodas da sonda. Durante a monitorização são obtidas medidas de inclinações a cada meio metro, à medida que a sonda se desloca de uma extremidade para a outra. A sonda é invertida e passada pelo tubo inclinométrico uma segunda vez. As medições obtidas na sonda invertida são utilizadas para eliminar qualquer erro que possa ter ocorrido devido à inclinação do sensor e de forma a validar a monitorização.

Os assentamentos e empenamentos são calculados como $L (\sin \theta_1 - \sin \theta_0)$, onde L é o intervalo de medição, θ_1 é a inclinação actual e θ_0 é a inclinação inicial.

Os perfis de assentamentos são gerados pela soma dos deslocamentos e pela sua apresentação gráfica (Slope Indicator, 2009).

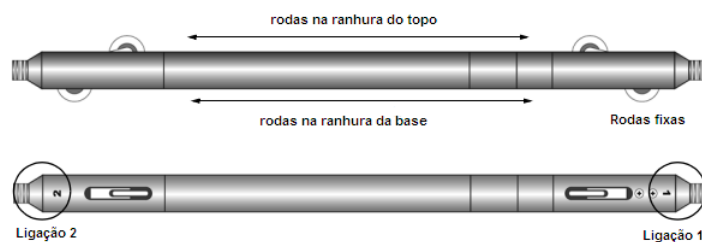


Figura 4.15 - Esquema de uma sonda inclinométrica horizontal (Slope Indicator, 2011)

Um outro tipo de sonda inclinométrica é a *in place*, embora de utilização menos frequente. Este tipo de sonda é instalada em situações onde é necessário a instalação permanente, no mesmo furo, de um conjunto de sondas ligadas mecanicamente entre si. Do ponto de vista económico esta é uma solução dispendiosa e por isso só se justifica a sua utilização quando se pretende uma observação contínua, dos movimentos envolvidos, ou quando se pretende uma maior exactidão, e assim elimina-se os erros associados à repetibilidade no posicionamento da sonda.

A sonda inclinométrica *in-place* consiste numa vara com um sensor inclinométrico *in-place*.

O tubo inclinométrico providencia acesso para as medições a partir da superfície, controlo da orientação dos sensores e, move-se com o solo envolvente.

Em furos horizontais o tubo é instalado numa zona que atravessa as áreas onde se suspeita que vá ocorrer o movimento e, prolonga-se até a um substrato estável. As ranhuras do tubo são alinhadas na direcção esperada do movimento.

As ranhuras do tubo controlam a orientação dos sensores *in-place*. Um cabo de aço inoxidável mantém os sensores na profundidade requerida.

Os sensores medem inclinações a partir da vertical. Ao mesmo tempo que ocorre o movimento do terreno, o tubo move-se com ele, alterando assim a inclinação do sensor no seu interior.

As medições das inclinações são depois processadas de modo a providenciar leituras de deslocamentos. Na maior parte dos sistemas os sensores estão ligados a um sistema de aquisição de dados e o processamento da informação é completado por um programa de computador (Slope Indicator, 2011).

Este tipo de equipamento tem como principais aplicações:

- monitorização de deformações de paredes moldadas que suportam escavações profundas;
- monitorização de movimentos de terrenos provocados pela construção de túneis;
- monitorização de deformações em aterros e muros de contenção;
- monitorização de áreas de deslizamento de terrenos nos taludes de albufeiras, auto-estradas e caminhos de ferro, de modo a providenciar aviso antecipado, no caso de rotura de terreno.

Um sensor *in-place* pode ser instalado como um único sensor ou uma corda de sensores ligados.

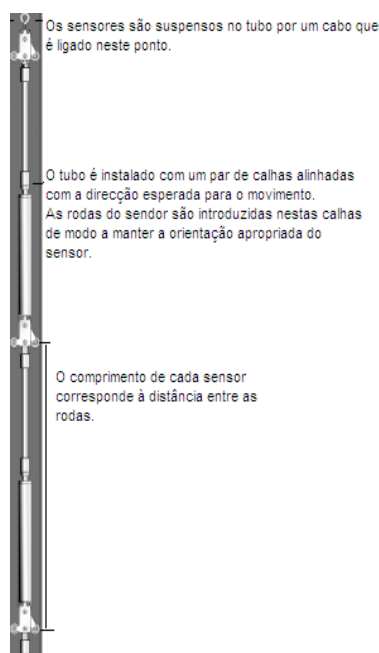


Figura 4.16 - Sonda inclinométrica *in-place* (adaptado de Slope Indicator, 2011)

Como em todos os equipamentos, as sondas devem ser sujeitas a calibração periódica, à verificação do seu estado e do funcionamento dos sensores. Uma das soluções é o envio das sondas ao fabricante, mas que não é o procedimento corrente.

Segundo Dunnicliff (Toco Emilio, 1991) o erro global obtido na medição de deslocamentos com o auxílio de inclinómetros que usam sensores acelómetros servos, situa-se entre 1 e 13 mm para uma integração ao longo de 30 metros, enquanto Pinto refere que de acordo com estudos estatísticos de Cornforth (Toco Emílio, 1991) o máximo desvio possível é de 5 mm, para a mesma distância.

Com os outros sensores a exactidão é de uma maneira geral menor.

Como já foi referido existem inúmeras aplicações para os inclinómetros, uma das quais a sua aplicação na observação de deslizamento de terrenos, como aconteceu na Auto-estrada A16 que liga Nápoles a Bari, na Itália a sul da região Apenina.

A área do deslize é de 400 m de comprimento e 70 m de largura foi definida através de uma análise geomorfológica (fotointerpretação e ensaios *in situ*).

Foram efectuados ensaios *in situ* na área afectada com uma profundidade máxima de 35 metros. A investigação consistiu em:

- 5 sondagens, das quais 4 estavam instrumentadas com tubos inclinométricos. Em cada sondagem foram efectuados ensaios Standard Penetration Test (SPT) e foram recolhidas amostras indeformadas;

- 4 sondagens instrumentadas com piezómetros de Casagrande (duas células em cada furo de sondagem);

- 10 penetrómetros dinâmicos.

O solo nesta área consiste numa formação superior de argila siltosa com 8,0 a 10,0 m de espessura e uma base de argila margosa.

Foram realizados ensaios para determinar as propriedades índice e para determinar as propriedades mecânicas.

Com base na informação preliminar (análise geomorfológica, sondagens e perfis dos ensaios de penetrómetros) concluiu-se que a superfície de deslizamento desenvolveu-se entre a argila siltosa e a formação argilo margosa.

Aparentemente, a informação preliminar parecia suficiente para projectar as medidas de remediação urgentes. Uma vez que os ensaios foram realizados como fazendo parte do plano de observação e como a velocidade do movimento de terreno era baixa, foi possível esperar pelos resultados dos inclinómetros instalados, antes de se proceder aos trabalhos de remediação.

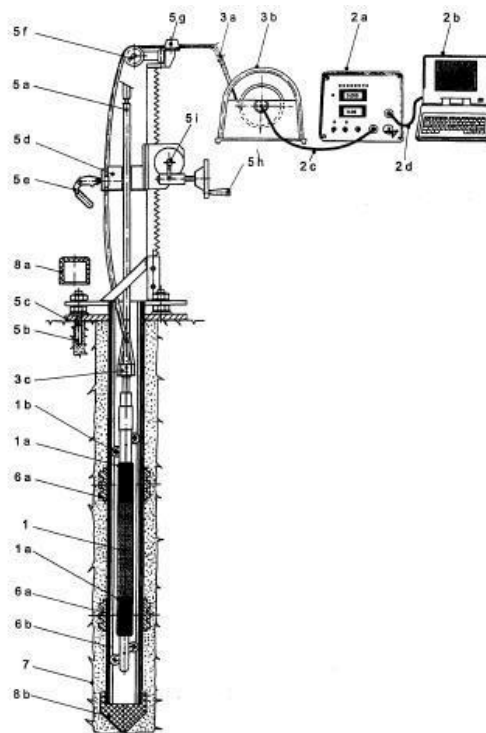
Os resultados obtidos nas leituras dos inclinómetros mostraram uma superfície de rotura mais profunda, a cerca de 19 m, enquanto que a obtida através da análise das informações preliminares deu uma profundidade de 10 m.

Com base no exemplo acima citado chega-se à conclusão que se se não tiver informação suficiente disponível as medidas de remediação devem ser projectadas com extrema cautela. Neste caso o projecto das medidas de remediação deve envolver trabalhos de natureza temporária. O projecto das obras de remediação final deve ser suportado pela informação completa obtida através da observação (Collota *et al.*, 1989).

4.3. *INCRemental Extensometer (INCREX)*

O INCREX é um sistema de medições extensométricas de alta precisão, com leituras compressão/extensão de metro a metro.

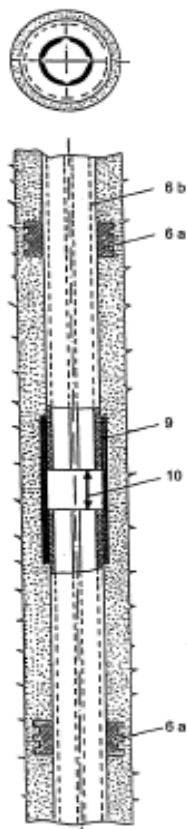
As figuras 4.17 e 4.18 representam o sistema de medição INCREX e os seus constituintes.



Legenda

- | | |
|---|--|
| 1 – Sonda INCREX | 5 b – parafusos de ancoragem (x3) |
| 1 a – duas bobinas de indução, espaçadas 1000 mm | 5 c – placa de base |
| 1 b – roda guia | 5 d – mandril |
| 2 a – unidade de leitura para leituras manuais | 5 e – dispositivo de fixação rápida |
| 2 b – computador para leituras automáticas | 5 f – roldana para o cabo |
| 2 c – cabo de ligação para a unidade de leitura | 5 g – braçadeira para o cabo |
| 2 d – cabo para transferência de dados | 5 h – roldana de ajustamento da posição da sonda |
| 3 a – cabo de medição | 5 i – cremalheira para ajuste de velocidade |
| 3 b – bobine de cabo | 6 a – anéis de medição (espaçados 1000 ± 20 mm) |
| 3 c – cabeça do cabo | 6 b – tubo inclinométrico ABS |
| 4 – centro de funcionamento (não ilustrado na figura) | 7 – furo de sondagem (diâmetro: 116 – 146 mm) |
| 5 – dispositivo de ajuste e de fixação | 8 a – tampa superior |
| 5 a – hastes de ajuste | 8 b – tampa inferior |

Figura 4.17 - Sistema INCREX (Interfels 2011)



Legenda:

6 a – anéis de medição.

Distância central : 1 000 mm

Diâmetro exterior : 86 mm

6 b – tubo inclinométrico ABS

Diâmetro exterior: 70 mm

Diâmetro interior : aprox. 60 mm

Comprimento: 3 000 mm

9 – manga para o tubo inclinométrico

Diâmetro exterior: 77.5 mm

Diâmetro interior: 70.2 mm

Comprimento: de 300 a 1 000 mm

10 – espaço entre terminos adjacentes dos tubos inclinométricos até 100 mm e em alguns casos mais.

Figura 4.18 –Tubo INCREX (Interfels,2011)

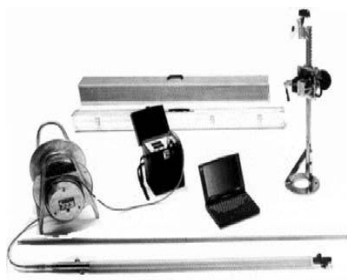


Figura 4.19 - Elementos que constituem o INCREX (Cardoso *et al.*, 2006)



Figura 4.20- Unidade de leitura do INCREX (Cardoso *et al.*, 2006)

O dispositivo possui anéis magnéticos exteriores à calha, solidarizados com o solo de aterro e espaçados de um metro na sua instalação. Os anéis podem deslizar ao longo do exterior da calha, acompanhando os deslocamentos do aterro segundo o eixo do instrumento.

A unidade de leitura permite detectar os movimentos dos anéis, quantificando-os através de indução electromagnética entre as espiras do torpedo e os anéis. Deste modo é possível obter uma grande precisão de leituras ($\pm 0,02$ mm, independentemente do comprimento do instrumento).

Para além de medir deslocamentos segundo o seu eixo, o INCREX também possibilita a medição de deslocamentos horizontais, através da utilização de calhas inclinométricas tipo ABS (Cardoso *et al.*, 2006)

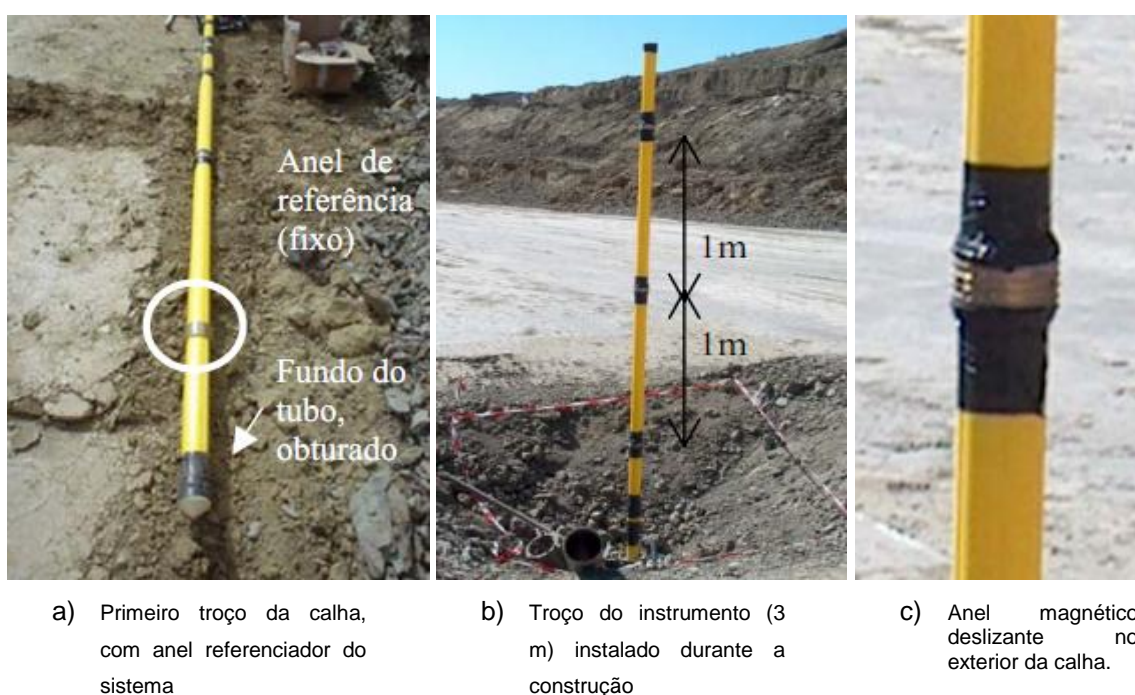


Figura 4.21- INCREX. Instalação (Cardoso *et al.*, 2006)

Especialmente utilizado para a determinação de perfis de assentamentos, perda de terreno e movimentos de terrenos (também combinado com medições inclinométricas) e na vizinhança de obras subterrâneas; em taludes e fundações. É ainda aplicado na construção em maciços rochosos, quer na construção civil, quer na indústria extractiva (Interfels, 2011).

Como é usual na maioria dos equipamentos de observação, quanto maior for a precisão do equipamento menor é a amplitude do intervalo de medição (campo de medida). No caso do INCREX, essa amplitude é de 20 mm (em 1 metro). Este valor é relativamente pequeno, podendo ser ultrapassado durante a construção, por este motivo não é usual instalar este sistema de medida na fase de construção (Cardoso *et al.*, 2006).

Para a medição do INCREX é introduzido um invólucro ABS no furo de sondagem. No lado exterior do tubo são instalados anéis metálicos de medição, que são espaçados em intervalos regulares (um metro). O espaço entre o tubo e o furo de sondagem é preenchido com argamassa, de modo a solidarizar o solo aos anéis de medição. A distância exacta entre anéis de medição adjacentes é medida pela sonda do INCREX, que é introduzida desde o exterior através do furo de sondagem.

A sonda do INCREX consiste num sistema de duas bobines de alta precisão a uma distância base de 1 m. Na posição de medição, os dois sistemas de bobines da sonda induzem os dois anéis de medição. Isto produz um sinal eléctrico que é proporcional à distância real entre os dois anéis de medição. O sinal do INCREX é a diferença entre o comprimento da base das bobines e a distância entre os dois anéis de medição (Interfels, 2011).

Segue-se um exemplo da utilização do INCREX para a medição de deslocamentos durante a construção de aterros. Trata-se da primeira vez que se instalou este tipo de equipamento durante a construção de um aterro em Portugal.

O exemplo refere-se à observação de um aterro da Auto-estrada A10, Bucelas/Carregado, sublanço Arruda dos Vinhos/IC11. Trata-se de um aterro em encosta, com um material margoso, pouco utilizado em aterros devido ao seu potencial expansivo.

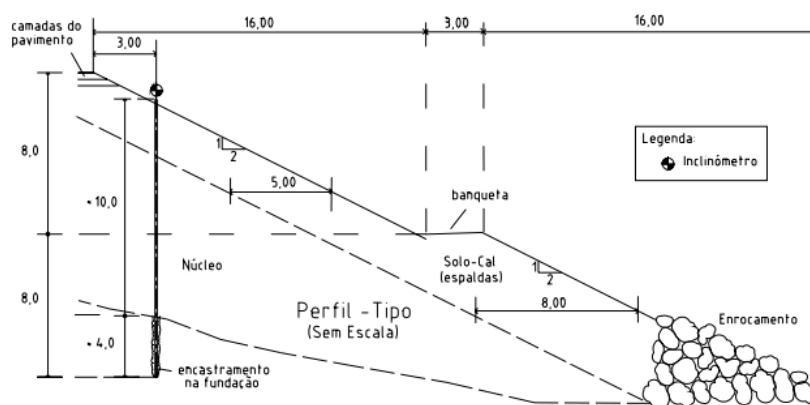


Figura 4.22 - Perfil transversal tipo (Cardoso *et al.*, 2006)

As deformações verticais do aterro podem ser devidas, por exemplo, aos efeitos da compactação das camadas sobrejacentes, ou à expansibilidade ou colapso das margas por contacto com água (chuva, excesso de água de compactação ou ascensão de água proveniente da fundação) durante a construção e após a mesma.

Foram efectuados ensaios de caracterização física e mecânica no solo, tais como ensaios granulométricos, limites de liquidez e plasticidade; ensaios triaxiais, ensaios de corte directo

reversíveis e ensaios edométricos. Foram ainda efectuados ensaios de expansibilidade/colapso das margas (Cardoso *et al.*, 2006).

O instrumento foi encastrado na fundação do aterro (margas não alteradas). O furo na fundação foi executado com recurso a um equipamento de sondagens que realizou uma furação destrutiva em cerca de quatro metros, estando os primeiros 0,5 m de aterro já realizados. No furo da fundação colocou-se o primeiro troço do instrumento, que tinha cerca de seis metros, os restantes troços, com três metros de comprimento, foram colocados à medida que o aterro foi sendo construído, num total de três troços, perfazendo o comprimento total de 15 metros. Na zona da fundação, o espaço anelar foi preenchido com calda de cimento para encastramento do tubo.

O primeiro troço da calha possui o ponto de referência do sistema que é o primeiro anel, fixo à calha e localizado a 0,5 m do fundo do furo. Os restantes anéis apenas têm que manter a sua posição (espaçamento de um metro) durante a instalação, tendo depois que deslizar livremente ao longo da superfície das calhas, acompanhando os deslocamentos do aterro.

Durante a compactação de cada troço foi necessário separar a calha, com os anéis já colocados, do solo a ser compactado, de modo a impedir que os anéis se deslocassem durante o processo mecânico da compactação pois se tal acontecesse as leituras reflectiriam os deslocamentos relacionados com esta operação, em vez dos deslocamentos posteriores do aterro. Por isso colocou-se um tubo de PVC, com um diâmetro de 200 mm e com um comprimento de cerca de 2 m, a proteger a calha, à volta do qual se foi construindo o aterro.

Quando a cota do aterro compactado atingia a distância medida ao topo do tubo de cerca de 0,5 m, o tubo de PVC de protecção era retirado e procedia-se ao enchimento do espaço anelar. Este espaço foi preenchido com solo do aterro em toda a extensão da calha excepto na zona dos anéis; nesta zona foi colocada uma mistura de cimento e bentonite de modo a criar uma zona de apoio ao anel, para a sua melhor solidarização com o aterro. Em seguida procedeu-se à união da calha do instrumento com a calha do troço seguinte e voltou-se novamente a enfiar o tubo PVC para a protecção do novo troço, repetindo-se o processo até à cota final do aterro. Na fase final a boca da calha foi protegida com um maciço de protecção de modo a evitar danos no instrumento, como ilustrado na figura 4.23 c).

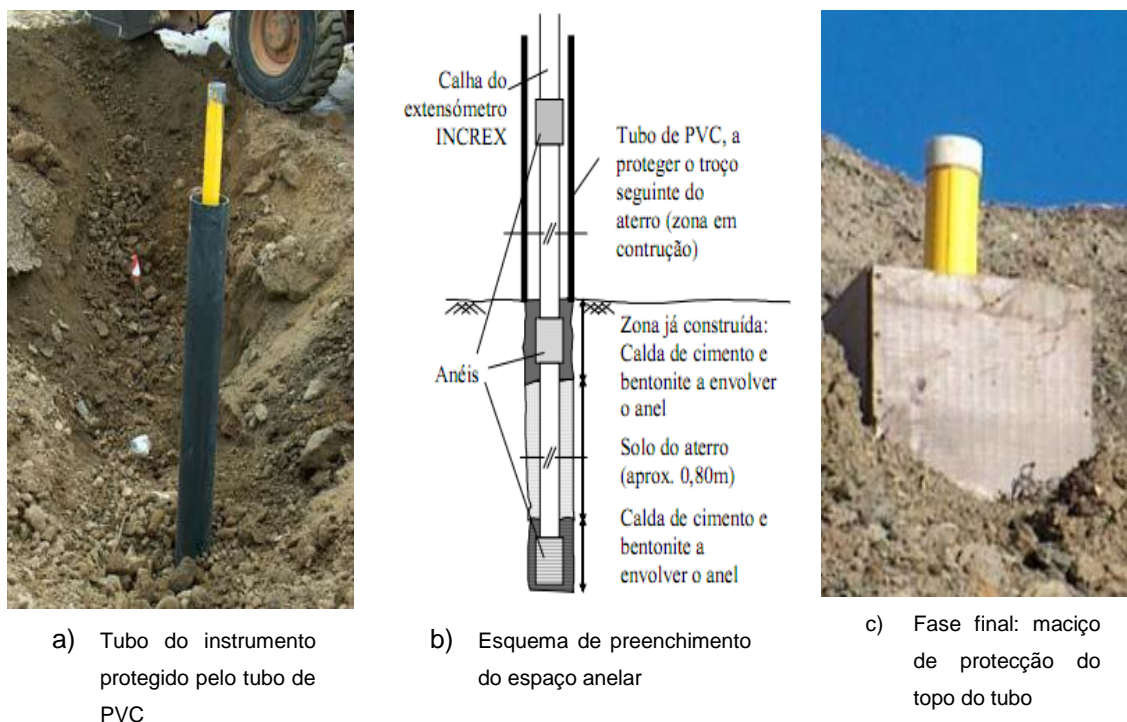
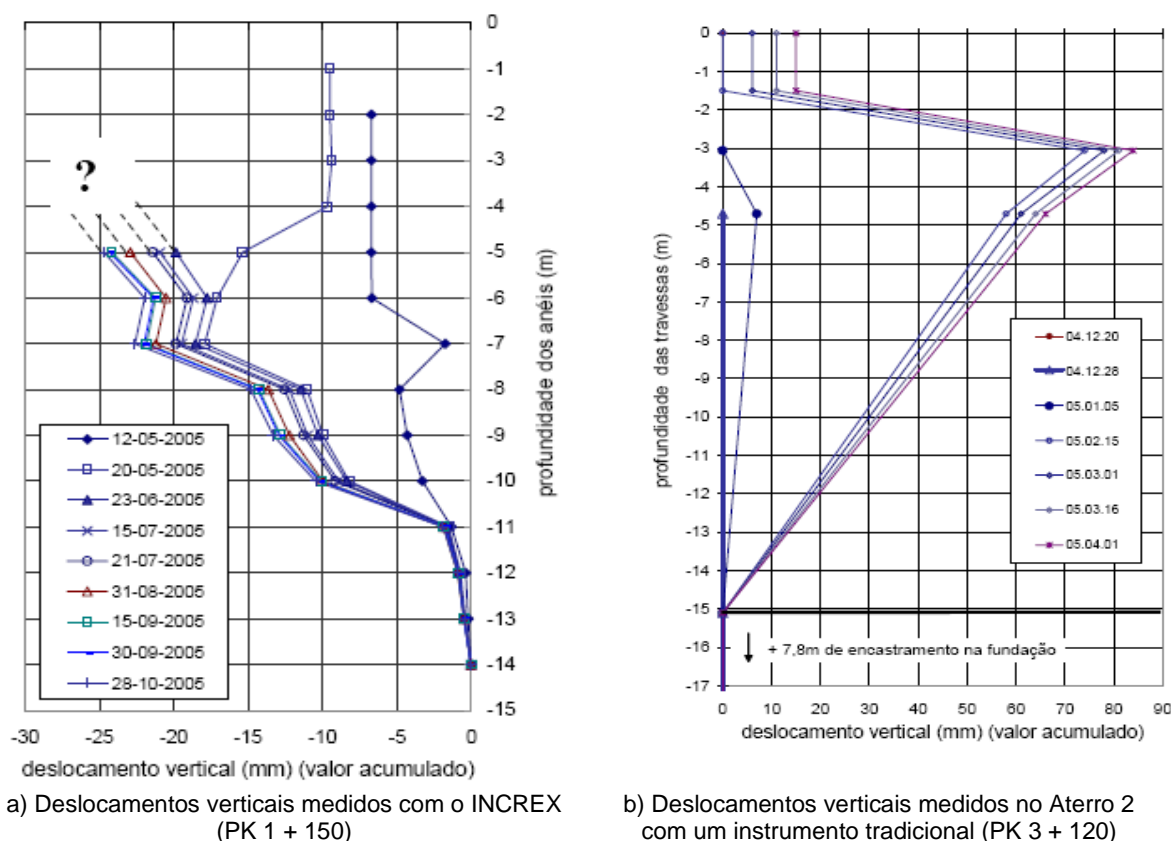


Figura 4.23 - Instalação dos instrumentos durante a construção (Cardoso *et al.*, 2006)

A construção do aterro terminou nos finais de Junho de 2005 e, até ao final do mês de Outubro de 2005 efectuaram-se nove leituras com um desfasamento temporal de cerca de 15 dias durante a construção (furação para instalação do sistema de medição em 20 de Abril de 2005, conclusão da construção em finais de Junho) e nos dois meses seguintes e, passando depois a efectuar-se de 30 em 30 dias.

O intervalo de tempo escolhido para cada leitura foi definido considerando:

- i) que a primeira leitura de cada um dos troços acrescentados só pôde ser efectuada após a presa da calda de cimento do espaço anelar envolvendo os anéis e;
- ii) que foi necessário aguardar que a superfície do aterro atingisse uma cota que permitisse o acesso ao topo das calhas para fazer as leituras.



4.24 – Deslocamentos verticais medidos nos dois aterros instrumentados na A10

A apresentação gráfica dos resultados do INCREX é semelhante à que é usualmente adoptada para os instrumentos tradicionais.

Os dados do gráfico 4.24 a) correspondem aos resultados obtidos no INCREX e os dados representados no gráfico 4.24 b) correspondem aos resultados obtidos com os instrumentos tradicionais.

Nos gráficos da Figura 4.24 observa-se os deslocamentos verticais medidos até ao dia 28 de Outubro de 2005 (cerca de três meses após a conclusão do aterro) no equipamento instalado no PK 1+150 (Cardoso *et al.*, 2006).

Devido ao ritmo da construção foram efectuadas apenas quatro leituras. Nesta fase não se conseguiu medir os deslocamentos devido à construção das camadas de aterro situadas entre as cotas -11 e -7 m. Pela observação do gráfico da figura 4.24 b) é possível constatar que os deslocamentos ocorridos nesta etapa são inferiores a 5 mm e seriam facilmente detectáveis pelos instrumentos INCREX.

Em 26 de Junho de 2006 ocorreu um acidente em obra em que ambos os instrumentos foram destruídos, pelo que as leituras efectuadas durante a obra só são relevantes até essa data. O local da rotura das calhas ocorreu sensivelmente à cota - 5 m. A primeira leitura após a substituição das calhas danificadas foi efectuada uma semana depois e não foram apresentadas no gráfico por não serem fiáveis.

Os resultados dos deslocamentos medidos por instrumentos tradicionais (instalados pelo LNEC) estão apresentados no gráfico 4.24 b). Estes equipamentos foram instalados num aterro da mesma obra (PK 3+120), por este apresentar materiais e concepção idênticos à do aterro em estudo (altura de 15 metros) e semelhanças entre os dois aterros, tanto no que respeita à geometria como ao processo construtivo, permitem comparar as medições efectuadas.

Como os dois aterros foram construídos de forma semelhante e com os mesmo materiais, pode esperar-se um andamento semelhante dos gráficos 4.24 a) e 4.24 b), pelo que os deslocamentos verticais máximos registados pelo INCREX ocorreriam a uma profundidade inferior a 5 m.

Da análise deste caso de obra pode-se concluir que para a instalação de instrumentos do tipo INCREX durante a construção é necessário assegurar que os deslocamentos expectáveis sejam inferiores ao campo de medida do sistema. Para tal é necessária uma caracterização cuidada da deformabilidade e expansibilidade do solo para que se possa justificar a escolha deste sistema de medição.

4.4. Assentímetros

Os assentímetros consistem numa célula desenhada com o objectivo de medir assentamentos em solos, em áreas de construção que estão inacessíveis, onde não é possível utilizar outras técnicas de observação. As suas aplicações principais são a observação de assentamentos ou empolamentos em aterros, assentamentos devidos a drenagem ou percolação, subsidências em túneis ou a consolidação em cavernas de armazenamento.

Os assentímetros são constituídos por três componentes:

- um tubo preenchido por um líquido;
- um transdutor e;
- um reservatório de líquido.

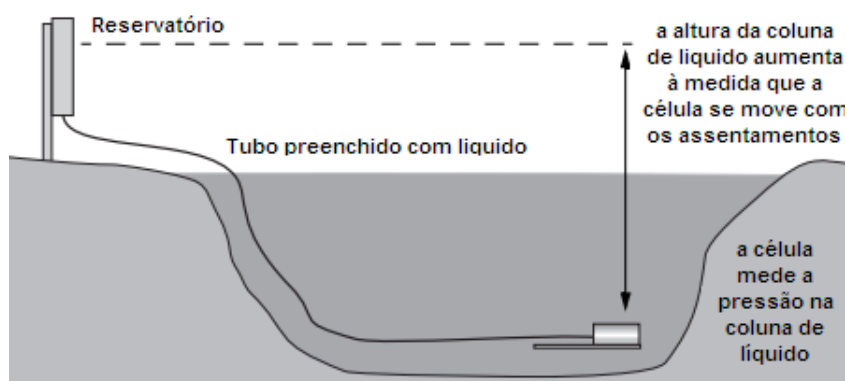


Figura 4.25 - Esquema tipo da instalação de um assentímetro (Slope Indicator, 2005)

O reservatório é instalado em terreno estável fora da área de influência da obra. O tubo preenchido com líquido está ligado desde o reservatório até ao transdutor que se encontra instalado no aterro ou num furo de sondagem.

O transdutor mede a pressão criada pela coluna de líquido no tubo. À medida que o transdutor assenta com o terreno envolvente, a altura da coluna de água aumenta e o transdutor mede essa alteração de pressão. Os assentamentos são calculados por conversão da alteração de pressão para milímetros de líquido.



Figura 4.26 - Célula de furo de sondagem



Figura 4.27 – Célula do assentímetro

A principal vantagem da utilização deste tipo de equipamento está relacionada com o facto de que, quer o reservatório, quer a unidade de leitura, podem estar localizados longe da área de construção. O tubo e a célula de medida estão enterrados na estrutura, não interferindo assim com as operações de construção (Slope Indicator, 2005).

4.5. Extensómetros

Quando se pretende medir deslocamentos relativos entre dois pontos pré-definidos que estão localizados no interior de aterros ou em furos de sondagens utilizam-se os extensómetros.

Ao contrário dos inclinómetros, a grandeza obtida nos extensómetros é um comprimento que define directamente a posição do ponto a ser observado.

Os extensómetros contêm no seu interior transdutores de deslocamento, normalmente electrónicos (LVDT, DCDT, potenciómetro linear, corda vibrante ou magnetostrictivo, entre outros).

São aplicados em zonas onde se esperam movimentos diferenciais localizados, tipicamente zonas de transição entre materiais com deformabilidades diferentes, em aterros ou solos naturais, ou ainda na vizinhança da cortina de barragens de aterro, quer esta seja central ou montante, em betão armado, argilosa ou de betão betuminoso (Toco Emílio, 1991).

Existem vários tipos de extensómetros entre os quais extensómetros de fita, extensómetros de fundação, extensómetros de corda vibrante e os extensómetros magnéticos.

4.5.1. Extensómetros de fita

Os extensómetros de fita são utilizados para a medição de pequenas variações de distância entre dois pontos. A sua aplicação mais usual é a medição da aproximação entre os hasteais ou entre o tecto e a soleira de escavações, túneis ou abertura de galerias mineiras. Outras utilizações são a monitorização de deformações de estruturas e a medição de movimentos em taludes instáveis.

Um extensómetro de fita consiste numa fita de aço, uma mola em tensão, um parafuso de ajuste em tensão, um “mostrador” e dois ganchos de fixação, que permitem que a fita seja fixa entre dois pontos (Slope Indicator, 2008).



Figura 4.28 - Extensómetro de fita (Slope indicator, 2008)

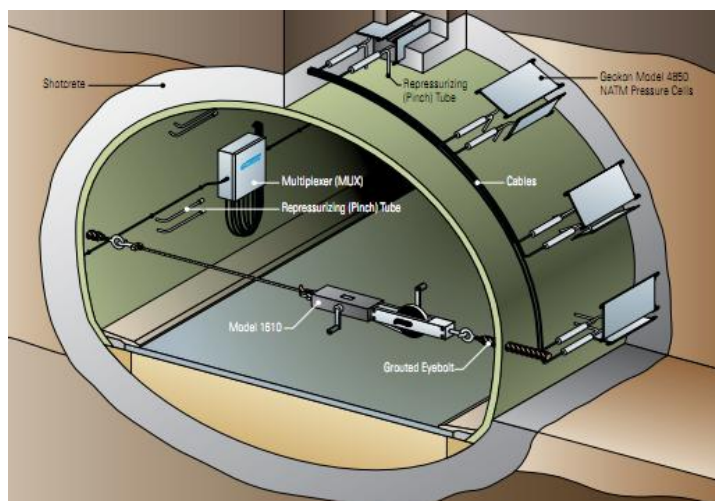


Figura 4.29 – Exemplo da utilização do extensómetro de fita. Monitorização da eficácia do revestimento do betão projectado (NATM) (Geokon)

O princípio de funcionamento do extensómetro de fita consiste em prender o gancho giratório do fim da fita numa argola num ponto de ancoragem. É permitido à fita desenrolar-se, de maneira a que o gancho giratório na outra extremidade do dispositivo possa ser ancorado na outra argola do segundo ponto de ancoragem. A folga da fita é retirada e um pino do dispositivo é inserido num dos orifícios espaçados em intervalos regulares ao longo de todo o comprimento da fita. A tensão final da fita é conseguida através da rotação de um parafuso de ajuste que diminui o comprimento total do dispositivo até que duas marcas de referência se encontrem. Nesta altura a fita é posicionada numa tensão de referência por meio de uma mola no seu interior. O mostrador indica a diminuição do comprimento total do dispositivo e regista, posteriormente, qualquer variação na distância entre dois pontos ancorados (Slope Indicator, 2008).

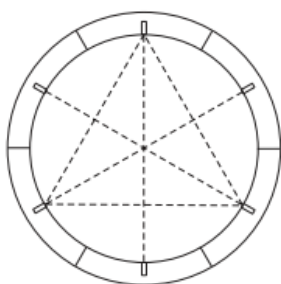


Figura 4.30 - Pontos de referência instalados em furos no revestimento de betão

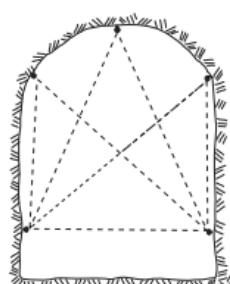


Figura 4.31 - Pontos de referência solidarizados em furos efectuados em rocha

4.5.2. Extensómetro de fundação

Os extensómetros de fundação são utilizados para medições em solo, rochas e estruturas de betão.

As suas principais aplicações são na determinação de movimentos de terrenos nas imediações de túneis, em obras de contenção, em minas a céu aberto, deformação de fundações em barragens de aterro, deformações em estacas, fracturação de tectos e soleiras de cavidades subterrâneas, subsidência em túneis e aberturas de minas e assentamentos e empolamentos de fundações em solos moles (Geokon, 2008).

Os componentes principais do extensómetro de fundação são as âncoras, as varas, um tubo de protecção e uma cabeça de referência e um deflectómetro. O tubo de protecção impede a ligação das varas do extensómetro ao terreno circundante (Slope Indicator 2009).



Figura 4.32 - Extensómetro de fundação com duas varas instalado numa galeria



Figura 4.33 - Deflectómetro do extensómetro de fundação

A selecção das ancoragens é feita de modo a que estas se adequem às condições do terreno, por exemplo, uma ancoragem que pode ser solidarizada ao terreno por meio de injeções é adequada para observações em rocha, enquanto que uma ancoragem com ligantes hidráulicos é adequada para observações em solos.

As varas são fabricadas em fibra de vidro ou aço inoxidável. As varas em fibra de vidro são montadas no fabricante e enviadas directamente para o local prontas a instalar, devido à sua flexibilidade são mais fáceis de instalar em áreas confinadas, como é o caso dos túneis.

As varas fabricadas em aço inoxidável requerem uma montagem no local da instalação. Como são mais resistentes permitem uma utilização em furos mais longos (Slope Indicator, 2008).

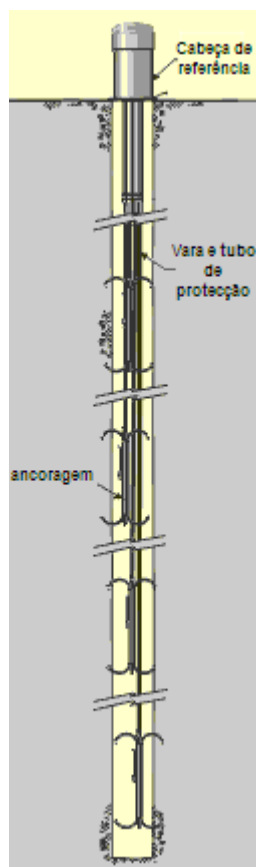


Figura 4.34 - Extensômetro de fundação instalado num furo de sondagem (Slope Indicator, 2011)

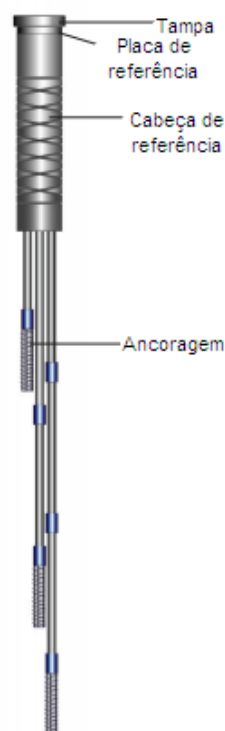


Figura 4.35 - Extensômetro de fundação múltiplo (Smartec, 2005)

A âncora é conectada à cabeça do instrumento por extensão das varas colocadas numa manga protectora. Esta protecção garante que as varas conseguem movimentar-se livremente e traduzir todos os movimentos da ancoragem para o topo da vara. Os movimentos do terreno relativos à cabeça podem ser calculados através da medição dos deslocamentos do topo da vara em extensão a um prato localizado na cabeça do extensómetro (Smartec, 2005).

Este tipo de equipamento é instalado em furos de sondagem, com diâmetros entre os 60 e os 90 mm, com um número de varas que pode variar entre as duas e as oito. De referir que os furos de sondagem onde são instalados este tipo de extensómetros deve ter mais um metro que a vara mais comprida, de modo a que essa vara fique ancorada num local onde não se esperam ocorrer movimentos (Slope Indicator, 2009).

4.5.3. Extensómetros de corda vibrante

Os extensómetros de corda vibrante são concebidos para serem instalados, em série, para medirem extensões horizontais e assentamentos em barragens de aterro ou enrocamento.

Existem ainda variações que permitem medir extensões em furos de sondagem e em barragens de BCC (Barragem de Betão Compactado a Cilindro) (Geokon).

Uma das extremidades do fio é ligada à cabeça amovível do extensómetro por uma mola. O deslocamento do extensómetro provoca uma alteração na tensão na mola, que por sua vez, altera a frequência da vibração do fio tensionado. Esta alteração de vibração do fio é uma medida da mudança de espaçamento entre o extensómetro e a ancoragem (Hanna, 1985).

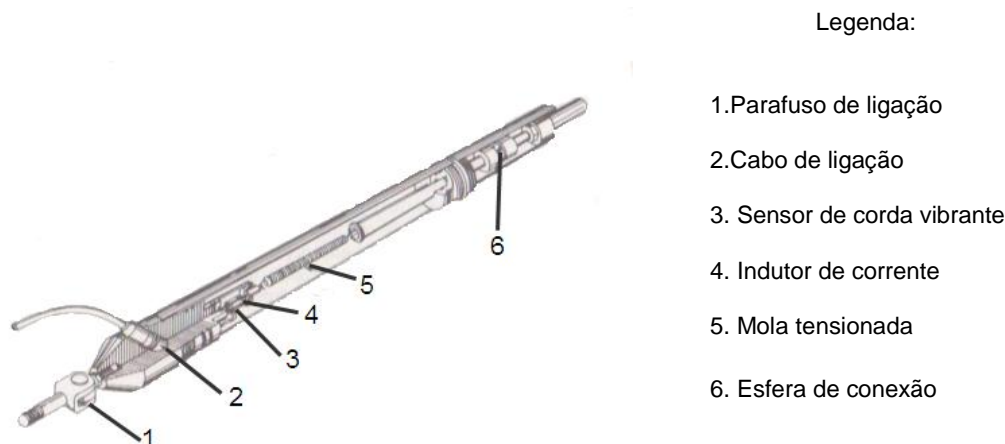


Figura 4.36 - Extensómetro de corda vibrante (Hanna, 1985)

Este tipo de extensómetro é instalado em valas escavadas à superfície, no filtro de barragens de modo a medir as deformações laterais ou verticais à medida que a barragem está a ser construída e para monitorizar as deformações contínuas à medida que as operações de construção avançam.

4.5.4. Extensómetros magnéticos

Este tipo de extensómetros são usualmente instalados em furos de sondagem ou em aterros para monitorizar assentamentos, estando associados a outro tipo de obras, nomeadamente, à construção mineira e túneis. Fornecem informação sobre zonas onde ocorrem assentamentos e ainda deslocamentos absolutos.

É constituído por uma sonda, uma fita métrica de aço, uma bobine de fita com uma luz embutida e campainha e um número de ímanes localizados ao longo de um tubo de acesso. Os ímanes são acoplados ao solo e deslocam-se para cima ou para baixo conforme empolamento ou o assentamento (Slope Indicator, 2002).



Figura 4.37 - Instalação de um magneto extensômetro num furo de sondagem (Slope Indicator, 2002)

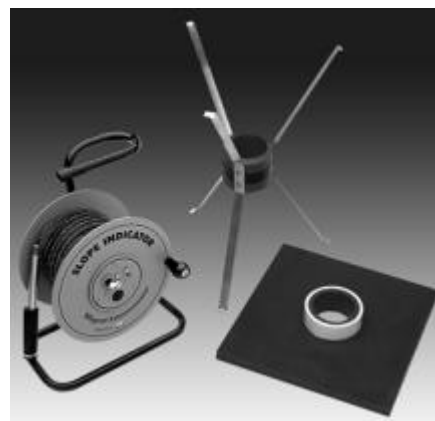


Figura 4.38 - Elementos que constituem o magneto extensômetro (Slope Indicator, 2002)

As leituras obtêm-se fazendo descer a sonda através do tubo de acesso de forma a encontrar os ímanes. Quando a sonda entra num campo magnético o interruptor fecha activando a luz e a campainha. Nesta altura o operador referencia 1 mm na fita métrica e anota a profundidade do íman.

Quando o tubo está ancorado em solo estável a profundidade de cada íman está referenciado a um referencial magnético que está localizado na base do tubo. Os empoamentos e os assentamentos obtêm-se por comparação entre a posição de cada um deles com a sua posição inicial (Slope Indicator, 2002).

4.6. Convergenciómetros

De um modo geral o convergenciómetro é um dispositivo para a medição de convergências em túneis.

A sua importância prende-se com a necessidade de estudar os fenómenos que ocorrem no subsolo (rochoso ou não) aquando de uma escavação para a abertura de um túnel ou de uma galeria.

A escavação introduz uma perturbação no maciço, que desta maneira perde a sua situação de equilíbrio, podendo observar-se ao longo do tempo movimentação das paredes do mesmo, mesmo depois de efectuadas operações de estabilização, como é o caso da aplicação do betão projectado.

Estes movimentos traduzem-se por uma redução da secção transversal do túnel, resultante de uma convergência das paredes, podendo ser detectadas pela medição, ao longo do tempo, da variação das distâncias entre pontos fixados nos hasteais do túnel.

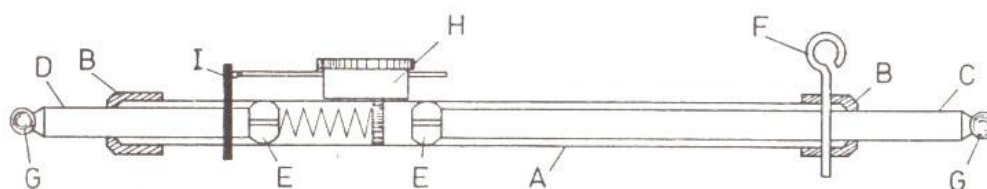
O importante a conhecer aqui não é o valor absoluto do deslocamento das cotas, mas sim a sua variação ao longo do tempo e com uma precisão da ordem do décimo de milímetro.

Existem dois tipos de convergenciómetros: os de haste e os de fita.

4.6.1. Convergenciómetro de haste

Este dispositivo destina-se a medir convergências em túneis de pequena secção.

É constituído por um tubo de duralumínio, de modo a reduzir o seu peso, com pinças de nylon nas extremidades, no interior do qual se deslocam dois tubos, também eles de duralumínio. As pinças tem a função de compensar a diferença entre os respectivos diâmetros dos tubos e permitir um deslizamento sem folga e sem que os tubos de duralumínio se toquem entre si.



Legenda:

- | | |
|---------------------|------------------|
| A- Tubo de alumínio | F- Cavilha |
| B- Pinças de nylon | G- Esferas |
| C- Tubo | H- Deflectómetro |
| D- Tubo | |

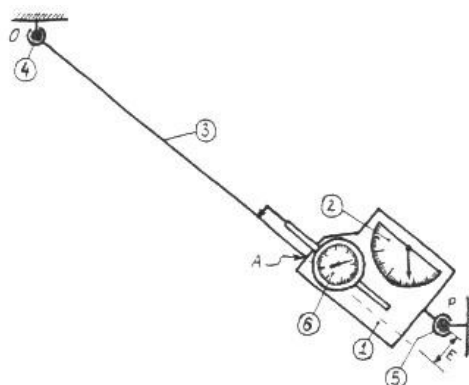
Figura 4.39 - Convergenciómetro de haste (LNEC, 1980)

O princípio de funcionamento consiste na detecção do tubo interior em relação ao tubo exterior através de um deflectómetro. O deflectómetro tem um campo de medida de 50 mm e uma resolução de 0,01 mm (LNEC, 1980).

4.6.2. Convergenciómetro de fita

Concebido para medição de distâncias superiores a 5 m, podendo chegar aos 12 m.

É constituído por uma fita, com furos de referência, enrolado sobre um tambor, a qual uma vez em posição é posto sob tensão através de um dispositivo apropriado.



Legenda:

- 1- Caixa
- 2- Clinómetro
- 3- Fita
- 4- Ligação da extremidade à fita
- 5- Rótula de ligação da caixa ao fixe
- 6- Deflectómetro

Figura 4.40 - Convergenciómetro de fita (LNEC,1984)

Este aparelho está equipado com um dispositivo que permite conhecer a orientação do aparelho em relação a uma direcção de referência (LNEC, 1984).

4.7. Fibras ópticas

A fibra óptica consiste num filamento de vidro de alta pureza, muito compacto, fabricado a altas temperaturas com base em sílica, que têm a capacidade de se deixar ser atravessado por um feixe luminoso, percorrendo-o através de reflexões consecutivas.

Tem uma estrutura cilíndrica, composta por um núcleo, a parte central da fibra, através da qual se dá a propagação da luz até ao seu destino, que é envolvida por uma bainha e por um revestimento.

A bainha é o material óptico exterior que envolve o núcleo e que reflecte a luz para o seu interior, eliminando ou limitando a refacção da luz e protegendo simultaneamente o núcleo.

A fibra é revestida por uma cobertura de plástico que a protege das influências externas que a possam danificar, como é o caso das condições ambientais (Ribeiro, 2009).

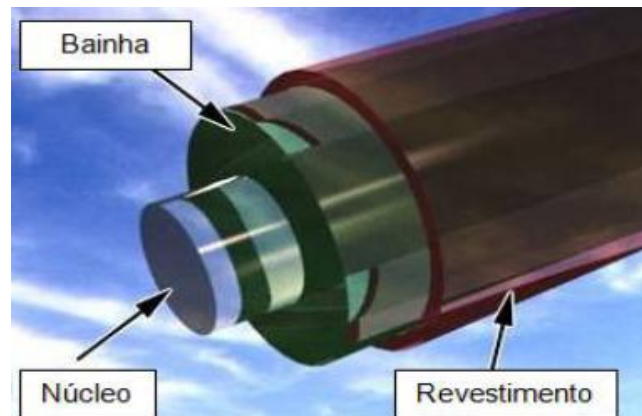


Figura 4.41 - Esquema de uma fibra óptica (Ribeiro, 2009)

O princípio de funcionamento dos Sensores de Fibra Óptica (SFO) baseia-se na modulação dos parâmetros da luz na fibra óptica. Estes parâmetros são intensidade, comprimento de onda, fase e polarização. Uma fonte óptica com propriedades ópticas constantes transmite luz por uma fibra e chega ao ponto de detecção (Naterop, 2002).

Um dos princípios utilizados pelos SFO baseia-se na separação da luz num sensor de fibra e numa fibra de referência. Este princípio é geralmente utilizado na medição de deformações e de deslocamentos. O sensor de fibra óptica é ligado mecanicamente à estrutura a monitorizar enquanto a fibra de referência está paralela ao sensor, mas não está ligado à estrutura. No fim de cada sensor há um espelho que reflecte a luz através do elemento de ligação – acoplador – até à unidade de leitura.

A unidade de leitura é constituída por dois sensores, também munidos de espelhos, para o qual a diferença de comprimento pode ser alterada e medida de forma muito exacta. Se a modulação da luz detectada (por um fotodiodo no interior da unidade de leitura) é alcançada, a diferença de comprimento entre a fibra da estrutura e a fibra no interior da unidade de leitura é compensada. O deslocamento ou deformação é neste momento igual à posição relativa dos espelhos da unidade de leitura (Naterop, 2002).

Segundo o mesmo autor, as aplicações típicas dos FOS são:

- i) Medições de tensões e de deslocamentos em barragens, túneis, pontes e outras estruturas de betão e aço;
- ii) Humidade e percolação de água;
- iii) Medições de pressões e de forças;
- iv) Monitorização de aterros sanitários;
- v) Monitorização da temperatura em construções subterrâneas.

As vantagens associadas à utilização das fibras ópticas são:

- são em parte insensíveis às influências da temperatura, humidade, corrosão, efeitos electromagnéticos e alta voltagem;
- é possível a automatização, mas comparativamente à automatização de outros métodos utilizados na observação de obras geotécnicas são onerosos.

As desvantagens são:

- data logging em pequena escala não é tão pequeno como no caso de outros sensores, como é o caso dos sensores de corda vibrante ou sensores eléctricos ou sensores com saída de sinal actual;
- os FOS para medição de deformações e deslocamentos são, comparativamente, com outros tipos de instrumentos para a observação das mesmas grandezas, mais dispendiosos e mais complicados de instalar, especialmente em furos de sondagens (Naterop, 2002).

Um exemplo da aplicação dos sensores de fibra óptica em obras geotécnicas foi a sua utilização na observação do túnel do Rossio. Esta estrutura é um túnel ferroviário do século XIX, em Lisboa, que apresentava anomalias graves que motivaram uma profunda intervenção estrutural.

Para a monitorização desta intervenção foi instalado um complexo sistema de observação destinado apenas a funcionar durante a fase de reparação. Este sistema foi complementado com um outro destinado ao acompanhamento da obra durante a fase de exploração.

No âmbito deste último foram instalados sensores de fibra óptica, para a medição de convergências em 135 secções do túnel mediante o Método Extensométrico para Monitorar CONvergências em Túneis (MEMCOT), dotado de acesso remoto. Com este método, é possível calcular as convergências de cada uma das secções instrumentadas com base na medição da deformação em sete pontos simetricamente distribuídos ao longo de cada secção. Foram utilizados 840 sensores, dos quais 735 para a medição de tensões e 105 para a medição de temperaturas (Ribeiro, 2009).

4.8. Fio-de-prumo

Utilizados para a medição de deslocamentos horizontais em barragens de betão, contrafortes de barragens, poços e edifícios altos. O esquema típico de um fio-de-prumo é o apresentado na figura 4.42 e 4.43.

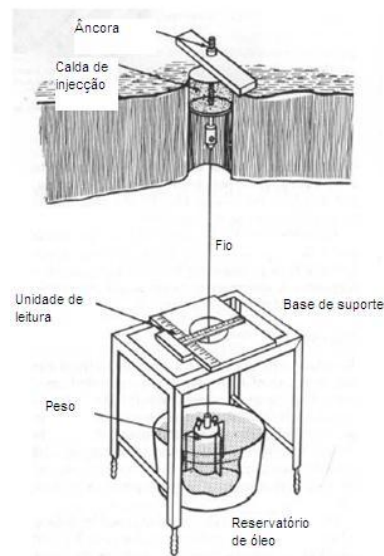


Figura 4.42 – Fio- de-prumo directo (Dunnicliff, 1988)

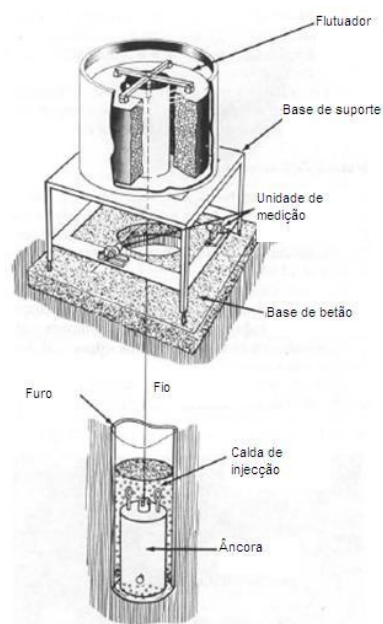


Figura 4.43 – Fio- de- prumo invertido (Dunnicliff, 1988)

O fio-de-prumo invertido é utilizado nas mesmas situações do fio-de-prumo directo, mas como materializa a vertical de um ponto suposto fixo, permite obter deslocamentos absolutos.

São ainda utilizados na medição de deformações absolutas da superfície e para estação de controlo nos métodos topográficos/geodésicos.

O flutuador, que é livre de se movimentar, mantém o fio em tensão, mantendo assim a sua verticalidade.

Claramente, os dois sistemas requerem um tubo quase vertical, quando a instalação se faz durante a construção ou um furo de sondagem quase vertical quando a instalação acontece depois da construção terminada ou ainda quando é instalado em terreno que não sofreu qualquer intervenção (Dunnicliff, 1988).

Os instrumentos podem ser lidos com uma exactidão de $\pm 0,5$ mm utilizando uma escala metálica ou de $\pm 0,03$ mm no caso de se utilizar um microscópio montado numa estrutura dotada de réguas graduadas com muita precisão que permita visar o fio em duas direcções ortogonais.

Como exemplo da utilização deste tipo de sistema foi a sua utilização em quatro barragens do Projecto de armazenamento do Rio Colorado, nos Estados Unidos da América. O sistema foi dimensionado em torno de um sistema óptico utilizado para controlar os robots industriais. São emitidos raios a partir de diodos que vão identificar a sombra do fio-de-prumo e os sinais são projectados numa matriz de fotodiodos que é digitalizada por um microprocessador.

Como todos os instrumentos, o fio-de-prumo, apresenta vantagens e desvantagens.

As vantagens dos fios-de-prumo directos e dos fios-de-prumo invertidos são a sua simplicidade e a sua longevidade. A sua principal desvantagem é a dificuldade na criação de um tubo ou furo de sondagem perfeitamente vertical, e as operações de furação para o furo de sondagem, mão de obra especializada e operações de furação onerosas (Dunnicliff, 1988).

5. Aplicação das metodologias de observação em obras geotécnicas

No capítulo que se segue descreve-se de um modo geral a aplicação de alguns dos dispositivos e equipamentos descritos nos capítulos anteriores a algumas obras geotécnicas.

5.1. Barragens

Do ponto de vista da observação existem três fases principais na vida de uma barragem: a construção, o primeiro enchimento e a fase de serviço. A observação é diferente em cada uma das fases, uma vez que os objectivos variam nas diferentes fases de vida, bem como as condições de carga. De fase para fase variam os instrumentos instalados e a frequência das medições.

As fases de construção e do primeiro enchimento são fases de carga inicial em que o controlo é feito de maneira a que os valores de atenção, alerta e alarme não sejam ultrapassados. Nestas fases todos os passos são monitorizados de maneira a controlar a aplicação das cargas, nomeadamente na construção de aterros e na subida do nível da água.

Segundo Choquet existem seis fases na observação de uma barragem:

- i) concepção global da monitorização;
- ii) definição e organização do sistema de observação;
- iii) especificações estabelecidas pelo chefe de projecto;
- iv) “Plano de Qualidade” concebido pela empresa responsável de implementar o sistema;
- v) medições durante a construção;
- vi) acompanhamento a longo prazo durante as operações.

No caso das fundações de uma barragem é a natureza e a estrutura geológica do local onde vai ser implementada a obra que tem maior importância para o projecto do sistema de observação.

A experiência sugere que os pontos seguintes devem ser monitorizados, essencialmente nas fundações e nos encontros:

- barragens de aterro: risco de erosão interna;
- barragens de betão: resistência ao corte.

5.1.1. Barragens de aterro

A observação das barragens de aterro é baseada na análise do comportamento da estrutura conduzida pelo projectista. O projectista considera certos tipos de deformação e as suas amplitudes, bem como os mecanismos de rotura que as originam e as potenciais mudanças nos materiais.

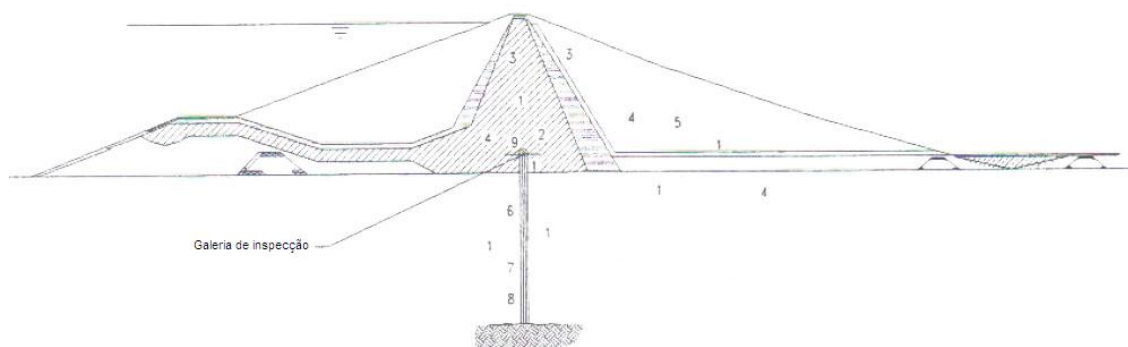
Os limites são o elemento chave na monitorização de barragens. E por limites entenda-se correlações de qualquer tipo no aterro, nas fundações, contrafortes, estruturas anexas e barragens mistas (aterro combinado com betão).

Os sistemas de monitorização são concebidos para determinar as redes de escoamento dos filtros e dos drenos, para verificar a eficácia dos sistemas de drenagem (ausência de pressão de jusante), monitorizar a pressão na fundação e seguir a evolução das redes de percolação no aterro em pontos críticos.

Assim os parâmetros mais importantes a medir numa barragem de aterro são:

- i) a pressão nos poros;
- ii) redes de percolação;
- iii) nível do reservatório;
- iv) nível da água nos encontros a montante.

Os resultados obtidos permitem o cruzamento de dados com as hipóteses feitas no dimensionamento da barragem.



Aterro (núcleo e paramentos)	Cortina de impermeabilização	Legenda:	
		Fundação	Galeria
1. Piezómetros	6. Extensómetros de fundação	1. Piezómetros	1. Piezómetros
2. Células de pressão	7. Extensómetros de fundação	4. Inclínómetros	9. Células de pressão
3. Extensómetros	8. Deflectores		
4. Inclínómetros	9. Células de pressão		
5. Assentímetros			

Figura 5.1 - Esquema de um sistema de observação numa barragem de aterro (Choquet, s.d.)

A figura 5.1. representa um diagrama com a localização dos equipamentos de observação. No contexto apenas importa destacar os instrumentos que se aplicam na determinação de deslocamentos, como é o caso da localização dos números 3, 4, 5, 6 e 7.

5.1.2. Barragens de betão

As barragens de betão podem ser classificadas em barragens de gravidade, barragens de contrafortes, barragens em arco ou de dupla curvatura. O betão pode ser aplicado de modo convencional ou compactado com cilindros. Estes métodos de construção de barragens podem alterar a escolha dos instrumentos, mas não altera os princípios gerais da observação, que se baseia na natureza das estruturas (Choquet *et al.*).

De seguida apresenta-se, de uma forma geral, os principais dispositivos para medição de deslocamentos nos diferentes tipos de barragens de betão.

i) Barragens de gravidade

As falhas em barragens de gravidade ocorrem, fundamentalmente, devido a dois fenómenos:

- deslizamento;
- rotação.

Este fenómenos podem ocorrer em toda a estrutura, ou como é mais comum, em apenas alguns blocos. De modo a se implementar um sistema de observação adequado deve-se entender os fenómenos associadas à possível falha.

O deslizamento pode ocorrer ao longo da interface betão-rocha ou na fundação, ao longo de uma superfície de menor resistência, tais como, diáclases (com ou sem preenchimento) ou camadas de materiais diferentes. A presença destas estruturas exige uma observação particular.

A falha por rotação pode ocorrer quando o resultado das forças aplicadas na barragem superam os critérios definidos no dimensionamento da estrutura.

Para este tipo de observação são instalados inúmeros equipamentos com a função de medir grandezas para além dos deslocamentos. Como neste trabalho apenas se destaca os deslocamentos, de seguida apresenta-se apenas um exemplo da localização de instrumentos com o intuito de observar esta grandeza.

Na figura 5.2 estão representados os equipamentos instalados para a medição de deslocamentos e rotação.

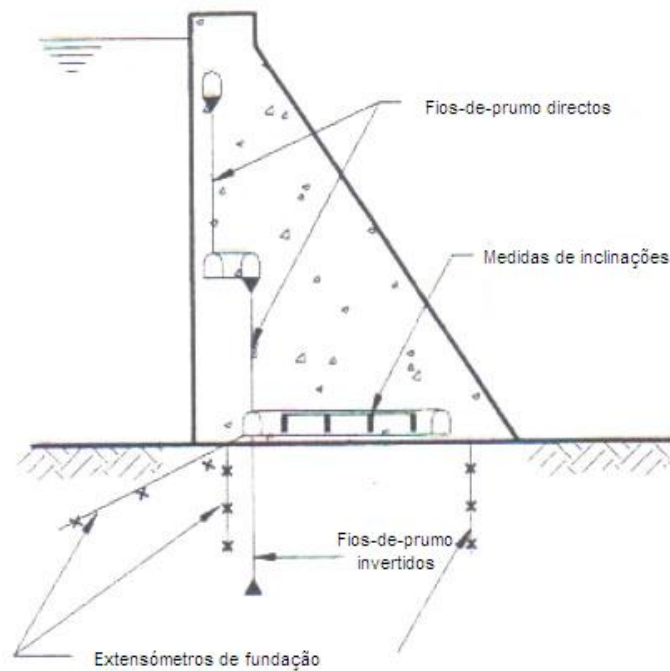


Figura 5.2 - Barragem de gravidade – Esquema geral de observação (Choquet et al., s.d.)

Para a determinação de deslocamentos horizontais utiliza-se:

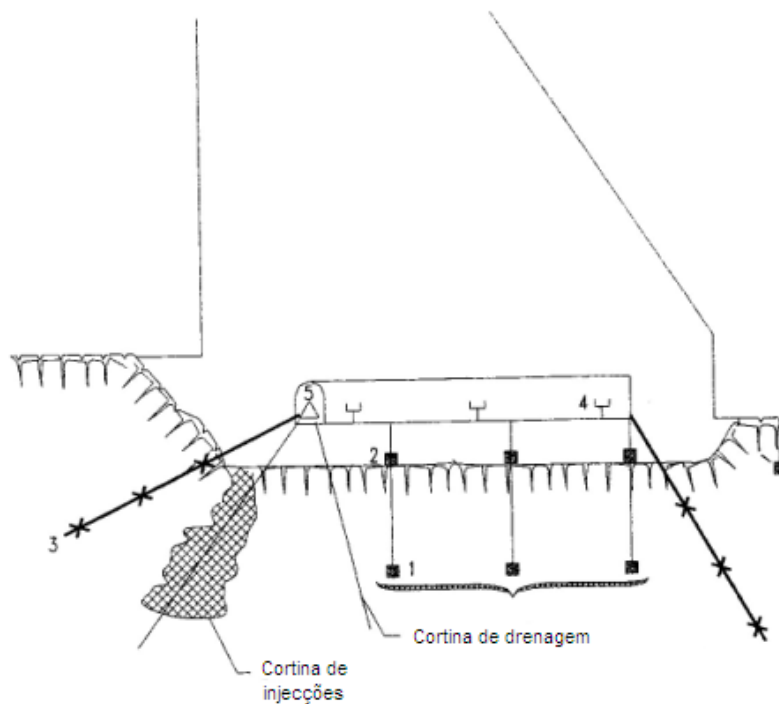
- fio-de-prumo directo e invertido;
- extensómetros de fundação inclinados.

Para a determinação de deslocamentos verticais:

- extensómetros de fundação;
- fio-de-prumo.

Para a determinação da rotação:

- fio-de-prumo directo e invertido;
- clinómetros.



Legenda:

- | | |
|---|--|
| 1- Monitorização da infiltração da fundação através da medição com células de pressão | 3- Observação dos deslocamentos recorrendo a extensómetros de fundação |
| 2- Medição da pressão intersticial na interface betão-rocha | 4- Observação da rotação da base da barragem por clinómetros |
| | 5 – Observação do fluxo de infiltração |

Figura 5.3- Barragem de gravidade. Observação da fundação (Choquet *et al.*s.d.)

De modo a monitorizar a resistência ao corte devem ser observados os movimentos na base da estrutura. As medições de deslocamentos, ao longo do tempo podem indicar a presença de esforços de tracção na fundação da barragem.

ii) Barragens de betão compactado com cilindro

As barragens de betão compactadas com cilindro são, em regra, barragens de betão de gravidade que diferem das outras pelo método de aplicação do betão. A maioria do volume destas barragens é construído através da disposição de camadas de betão que são compactadas com um cilindro, à semelhança daquilo que acontece na construção de barragens de aterro.

A estabilidade deste tipo de estruturas é providenciado pelo seu peso, resultado da sua forma trapezoidal ou da sua forma triangular.

A rotura numa barragem de betão compactado com cilindro é da mesma origem das de gravidade:

- deslizamento e;
- rotação.

A acrescentar a estas há ainda as falhas que podem ocorrer localmente e que são específicas de barragens compactadas a cilindro:

- infiltração de água entre camadas de betão compactado a cilindro, que pode conduzir a elevadas pressões hidrostáticas atrás do paramento de jusante ou até de montante, no caso de ocorrer um esvaziamento rápido da albufeira;
- ligação ineficiente entre os paramentos e o corpo da barragem;
- fissuração não controlada nas juntas verticais.

A monitorização das barragens de betão compactado a cilindro é feita da mesma maneira que a das barragens de gravidade.

O maior interesse é a medição da fissuração na estrutura e na abertura das juntas. Esta medição é realizada com a ajuda dos seguintes equipamentos:

- extensómetros de base pequena;
- extensómetros de bases longas;
- termómetros;
- fissurómetros;
- piezómetros de corda vibrante.

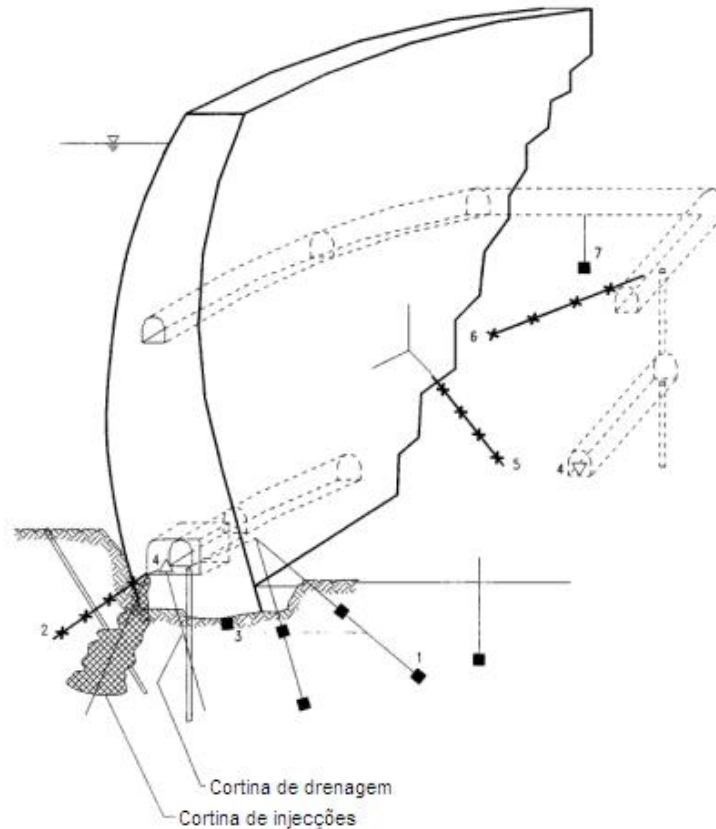
iii) Barragens de contrafortes

Os modelos de falha nas barragens de contrafortes são essencialmente os mesmos que os das barragens de gravidade, nomeadamente deslizamento e rotação. Apenas diferem num tipo específico de falha deste tipo de barragem que é a laje impermeável.

Assim, também a observação deste tipo de barragens é do tipo da instalada nas barragens de gravidade, sendo os equipamentos, neste caso, instalados nos contrafortes.

iv) Barragens em arco

As barragens em arco possuem perfis muito mais esbeltos que as barragens de gravidade. A sua face é convexa para jusante, de modo a que as cargas sejam transmitidas à fundação e aos encontros. A estabilidade deste tipo de barragem baseia-se na competência do maciço rochoso dos encontros. As falhas associadas a este tipo de estrutura são causadas, essencialmente, por deslizamento da fundação ao longo de plano de menor resistência.



Legenda:

- | | |
|---|---|
| 1- Observação do fluxo de jusante das cortinas de injeção e drenagem, através da medição da pressão | 5. Observação da compressibilidade da fundação, utilizando extensómetros de fundação |
| 2. Observação de movimentos causados pela fissuração utilizando extensómetros de fundação | 6- Observação de acidentes geológicos específicos, utilizando extensómetros de fundação |
| 3. Pressão medida na interface betão-rocha | 7. Medição da pressão de água para observação da cortina de injeções |
| 4. Fluxo de infiltração | |

Figura 5.4 - Barragem de betão. Observação da fundação (Choquet *et al*, s.d.)

Os instrumentos utilizados para observar este tipo de barragem são, genericamente, os mesmos que se utilizam nos outros tipos de barragens, sendo que a fundação merece uma atenção especial. Assim, determinam-se:

- deslocamentos horizontais;
- deslocamentos verticais;
- rotação;
- fissuração e deslocamentos de juntas e;
- fluxos de escoamento.

São utilizados os mesmos equipamentos que se utilizam nas barragens de gravidade, apenas com a diferença de terem uma maior resolução e precisão.

5.2. Túneis

Os túneis são, usualmente, dimensionados com base em métodos empíricos ou com base em experiência em obras semelhantes. Devido aos movimentos nas três direcções, resultantes das operações típicas neste tipo de obra e devido à sensibilidade das estruturas adjacentes, é comum instrumentar secções críticas do túnel, de modo a confirmar que os trabalhos seguem como planeado, de modo a melhorar o dimensionamento de obras futuras e de modo a providenciar informação concreta, que pode ser adquirida numa etapa mais avançada da obra (Hanna, 1985).

Segundo Dunnicliff (1988) os factores que influenciam a estabilidade de uma escavação incluem a estratigrafia, a pressão de água, a resistência do maciço terroso ou do maciço rochoso, a geometria, o método de escavação, tipo de suporte, a sequência de abertura e suporte e o método de instalação do suporte.

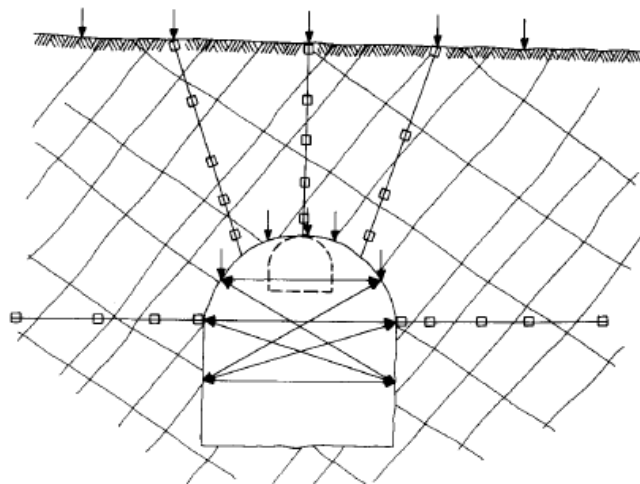
Quando se trata de um maciço rochoso a estabilidade é dada pela presença e orientação de descontinuidades e da pressão de água nas descontinuidades. Neste caso as falhas ocorrem, geralmente, como resultado de deslizamento ou separação das descontinuidades.

A estabilidade de túneis em solos é, usualmente, controlada pela resistência ao corte não drenada, quando se trata de argilas. Quando o solo é classificado em siltes ou areias finas, a estabilidade é controlada, de uma forma geral, pela eficácia da drenagem durante a construção.

De seguida apresenta-se uma tabela com os equipamentos utilizados na observação de secções totais de um túnel.

Tabela 5.1 - Instrumentos adequados para observação de deformações em secções totais de um túnel

Medições	Instrumento adequado
Deformação da superfície e estruturas	- Métodos topográficos/geodésicos - extensómetros de varas
Assentamento de edifícios públicos	- assentímetros
Alteração da abertura de fissuras em edifícios	- medidores de fissuras
Deformações na escavação	- métodos topográficos/geodésicos - Convergenciómetros
Deformação na área de influência de um túnel em solo	- inclinómetros - extensómetros - extensómetros de fundação
Deformação na área de influência de um túnel em rocha	- extensómetros de fundação - ondas acústicas



Legenda:

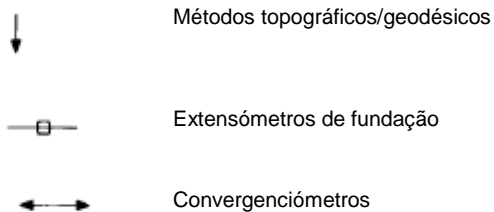


Figura 5.5 – Possível sistema de observação de uma secção de um túnel em maciço rochoso (Dunnicliff, 1988)

5.3. Movimento de terrenos

Apesar de haver uma evolução no conhecimento do comportamento dos movimentos de terreno, estes continuam a ser uma ameaça devido à expansão das zonas urbanas para locais com declives acentuados, uma vez que cada vez mais as áreas disponíveis para construção estão a diminuir.

Ora colocar vidas humanas sujeitas a este perigo constitui um risco, sendo este tipo de desastre que provoca mais perdas de vidas e mais dinheiro do que todos os outros desastres naturais juntos.

O custo económico da observação de movimentos de terrenos é baixa comparativamente ao que iria gastar mais tarde em operações de resgate, remoção de escombros e a futura reabilitação (Encardio Rite, 2003).

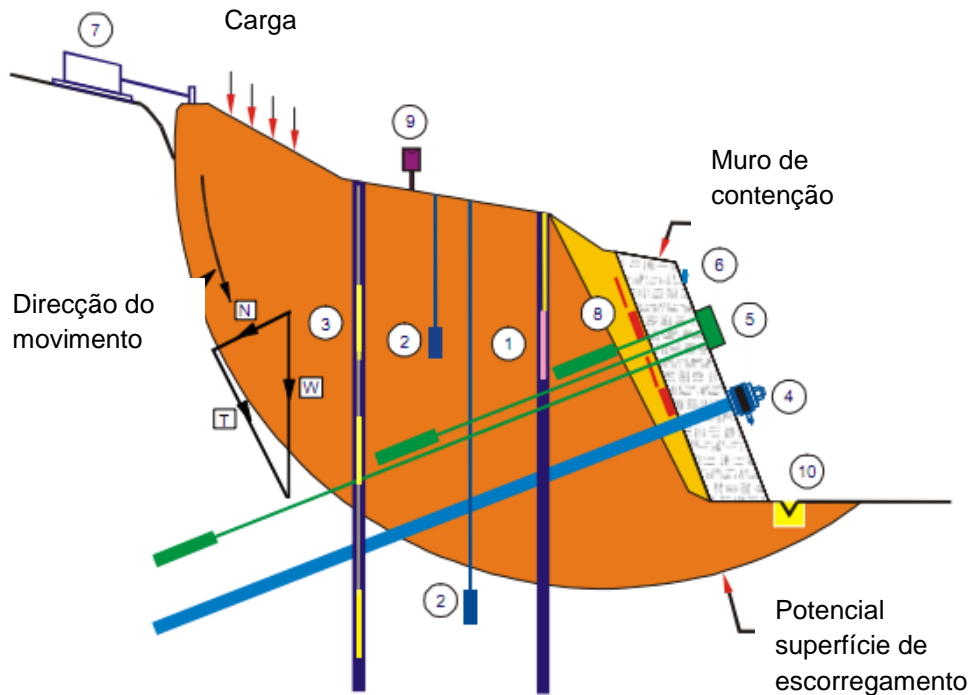
A observação de encostas sujeitas a movimentos de terrenos torna possível uma intervenção atempada antes da ocorrência do movimento, permitindo tomar medidas de contenção, como é o caso de implementação de drenagem apropriada, a utilização de ancoragens ou a construção de muros de suporte.

Segundo o artigo da Encardio Rite (2003) existem quatro opções para movimentos de terrenos em zonas inclinadas:

- não fazer nada e resignar-se à inevitável rotura da superfície e ao posterior movimento de terrenos e à eventual destruição que este pode causar;
- monitorizar o talude, de maneira a detectar qualquer sinal de instabilidade e assim tomar as medidas de protecção antes das condições de alarme serem instaladas;
- proceder à estabilização dos taludes que o necessitem;
- e se for o caso instalar um sistema de observação para verificar que a estabilidade do talude foi alcançada.

Os instrumentos utilizados para este propósito são:

- piezómetros (medição da pressão da água);
- inclinómetros (medição da inclinação ou movimentos laterais);
- fissurómetro de fio (para monitorizar fendas ou movimentos de massas de rocha);
- células de carga (medição do aumento de tensões no bolbo de tensões nas ancoragens);
- extensómetros de fundação;
- estações totais, teodolitos e distanciómetros electrónicos (deslocamentos superficiais);
- monitorização acústica



Legenda:

- | | |
|--------------------------------|------------------|
| 1 Inclínometro | 6 Tiltmeter fixo |
| 2 Piézometro | 7 Fissurómetro |
| 3 Inclínometro <i>in place</i> | 8 Stress meter |
| 4 Célula de carga | 9 Pluviómetro |
| 5 Extensómetro de fundação | 10 Caudalímetro |

Figura 5.6 - Observação de um talude (Encardio Rite, 2003)

5.4. Muros de suporte

O dimensionamento de um muro de suporte baseia-se, em grande parte, em métodos empíricos e em experiência em situações semelhantes. As consequências de um mau desempenho neste tipo de estruturas pode ter efeitos, em alguns casos, catastrófico. Um plano de observação pode não ser necessário no caso de um dimensionamento muito conservativo, se existir uma experiência anterior em obras similares em condições idênticas ou se as consequências de um mau desempenho por parte da estrutura não forem graves. Contudo, noutras circunstâncias, um plano de observação é necessário para assegurar que a escavação é segura e que as estruturas vizinhas não são afectadas.

Dependendo das especificações de cada caso, o plano de observação pode ser aplicado ao muro e à escavação, ao terreno subjacente ou nas imediações da escavação e/ou às estruturas adjacentes (Dunnicliff, 1988).

De seguida apresenta-se uma tabela com os diferentes tipos de instrumentos e dispositivos utilizados na monitorização de escavações.

Tabela .5.2- Instrumentos adequados para monitorização quer a escavação se encontre estável, quer as estruturas circundantes estejam a ser afectadas pelos movimentos de terreno (adaptado de Dunnicliff, 1988)

Medições	Instrumentos adequados
Assentamentos à superfície, estruturas e no topo do muro de suporte	- Métodos topográficos/geodésicos - Extensómetros de varas
Deformação horizontal da superfície, estruturas e parte exposta do muro de suporte	- Métodos topográficos/geodésicos - Convergenciómetro - Fios de prumo
Fendas nas estruturas e em edifícios públicos	- Medidores de fendas
Assentamentos subsuperficiais do terreno e de edifícios públicos	- Assentímetros subsuperficiais - Extensómetros - Extensómetros de furos de sondagem fixos
Resistência em escavações exteriores	- Células de carga - Macacos hidráulicos e células de carga (lift off test) - Extensómetros de corda vibrante
Pressão da água	- Piezómetros
Empolamento	- Extensómetros magnéticos - Extensómetros - Extensómetros de furo de sondagem fixos - Inclínómetros

6. Perspectivas

No final de cada obra é realizado um relatório sobre o desempenho da observação que deve incluir os aspectos relacionados com a contribuição desta para a funcionalidade e segurança da obra, bem como a aplicação do método observacional no sentido da adaptação do projecto, dos processos construtivos e do programa de construção.

Este relatório deve ainda conter o relato dos sucessos, tais como, incidentes e acidentes evitados ou controlados, alterações em obra, controlo e ajustamento dos processos de construção, economia na construção, encurtamento de prazos, adaptações justificadas do plano, etc. e, dos insucessos, como é o caso da dificuldade de instalação, avarias, perturbações do ritmo construtivo, falta de fiabilidade, falsos alertas, incapacidade para prever incidentes ou acidentes, problemas de comunicação, falhas na cadeia de comunicação, etc..

De modo a melhorar o conhecimento nesta área deve ser feita uma reflexão sobre o que deveria ter sido observado, tendo em conta o conhecimento acumulado no decurso da construção, fazer recomendações sobre o que deverá continuar a ser observado no decurso da vida útil da obra e, calcular a percentagem do custo da observação em relação ao custo total da obra.

De salientar a necessidade de se efectuar uma análise global dos elementos da observação tendo em vista uma reflexão crítica sobre aspectos de projecto, de construção e de programação visando a aplicação dos ensinamentos obtidos em obras similares futuras e a introdução de dados com vista a complementar o cadastro, com os elementos relevantes da caracterização e do comportamento de formações típicas de uma determinada região.

Por fim, o aproveitamento de casos de obra importantes e paradigmáticos para investigar determinados aspectos de comportamento (com recurso a financiamento de instituições de apoio à actividade e I&D) com vista à incorporação dos conhecimentos em obras futuras (Silva Gomes, 2010).

7. Considerações finais

Nesta dissertação fez-se um trabalho de recolha bibliográfica que teve como objectivo o estudo da observação de deslocamentos em obras geotécnicas, tendo sido referidos os seus principais objectivos, métodos e aplicações.

Como já foi referido anteriormente, as falhas estruturais em obras geotécnicas podem ter consequências catastróficas, envolvendo a perda de vidas humanas e prejuízos materiais e ambientais importantes. É devido a estes factor que actualmente a observação das obras geotécnicas é inquestionável e é por isso que tem vindo a ser usada amplamente, visando, em particular, a detecção em tempo útil, da possibilidade da ocorrência de falhas.

O Eurocódigo 7 – Projecto geotécnico contempla a observação de obras geotécnicas e indica os objectivos, referindo aspectos tais como o plano de observação, os parâmetros a medir, a função dos intervenientes, etc., tal como o Regulamento de Segurança de Barragens, aprovado em decreto-Lei (11/90 de 6 de Janeiro), que define os princípios gerais a ter em conta na observação. Neste regulamento faz-se também referência aos responsáveis pela realização das actividades correspondentes. Assim, e de acordo com este regulamento, as entidades envolvidas no controlo de segurança das barragens são: a Autoridade, o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), o Dono de Obra, o Projectista e a Autoridade Nacional de Protecção Civil (ANPC).

De uma forma geral pode-se afirmar que os principais objectivos da observação de obras geotécnicas são monitorizar o comportamento e as características do terreno de modo a prever o seu comportamento quando este é sujeito a cargas, movimentos e outras acções que podem ter origem em fenómenos naturais ou originadas pela acção do Homem (Vallejo *et al*, 2006).

De salientar a importância do método observacional na observação de obras geotécnicas e o modo como este possibilita a adaptação do projecto durante a fase construtiva, e se os resultados obtidos não estiverem de acordo com os previstos, devem ser accionados mecanismos pré-estabelecidos de modo a proceder-se aos ajustes necessários ao projecto e/ou aos métodos construtivos.

Actualmente, existem vários métodos para a determinação de deslocamentos em obra geotécnicas e estes podem classificar-se em deslocamentos de pontos superficiais, que são aqueles cujas referências são visualmente acessíveis e estão instaladas, por exemplo em, paramentos de barragens, superfícies de taludes, galerias ou túneis, paredes de exteriores de edificações ou, em deslocamentos internos, que consistem na medição de deslocamentos de referências visualmente inacessíveis, colocadas no interior das estruturas a observar.

Os métodos de determinação de deslocamentos superficiais em obras geotécnicas dividem-se em métodos topográficos e geodésicos (a diferenciação entre métodos topográficos e métodos geodésicos no contexto deste trabalho está relacionado apenas com a precisão das medições, sendo que os métodos topográficos apresentam precisões na ordem dos centímetros, enquanto que os métodos geodésicos apresentam precisões na ordem dos milímetros), GNSS, varrimento laser e fotogrametria.

De realçar a campanha de referência, que corresponde à leitura zero, que posteriormente vai servir de comparação para outras leituras. Esta leitura deve ser efectuada com o maior rigor possível, uma vez que, se esta contiver incorrecções todas as leituras posteriores irão ser influenciadas pelos correspondentes erros.

As metodologias de observação de deslocamentos internos relacionam-se com a medição de pontos que, ao contrário dos deslocamentos superficiais, não se encontram acessíveis. Estas metodologias consistem na instalação de dispositivos e instrumentos, tais como, inclinómetros, INCREX, extensómetros, convergenciómetros, sensores de fibra óptica ou fios-de-prumo, que têm como função determinar as grandezas que se pretendem obter.

A escolha dos equipamentos deve ter atenção as seguintes características: sensibilidade, precisão, campo de leitura, estabilidade, robustez, tempo de resposta, efeito do meio e a garantia das leituras e ter ainda em consideração os seguintes factores: manutenção, compatibilidade com as técnicas construtivas e o custo (Sêco e Pinto, 2000).

Um factor importante é a possibilidade de automatização dos equipamentos, estando esta automatização dependente, entre outros, da viabilidade, dos custos, da importância da obra e da relação que as grandezas a observar têm directamente com a segurança da obra. A automatização é particularmente recomendável para as grandezas obtidas em equipamentos instalados em locais de muito difícil acesso ou que possam representar riscos para o pessoal encarregado da sua exploração

Os principais tipos de obras geotécnicas que importam observar são as barragens, os túneis, aterros e escavações rodoviárias e os muros de suporte. Para além disto, também os movimentos de terrenos são objecto de observação devido ao seu potencial efeito destruidor.

O sistema de observação em barragens difere consoante a tipologia da barragem. Uma barragem de terra não apresenta o mesmo sistema de observação que uma barragem de betão, sendo que mesmo as barragens de betão diferem em alguns pormenores de tipo para tipo, por exemplo, uma barragem de gravidade não tem o mesmo sistema de observação que uma barragem de arco.

Assim, nas barragens de aterro as principais preocupações são as pressões intersticiais, as redes de percolação, o nível de água na albufeira e os deslocamentos, sendo por isso os factores que merecem mais atenção por parte dos responsáveis pela obra.

Os principais fenómenos que podem provocar a rotura de barragens de betão são o deslizamento e a rotação. Nestas, as principais grandezas a medir são os deslocamentos.

A estabilidade da escavação de um túnel pode depender de vários factores, entre eles, a estratigrafia, pressão de água, geometria, resistência ao corte do maciço, método de escavação, tipo de suporte ou até mesmo o método de instalação deste último. As grandezas a observar num túnel são a deformação da superfície e das estruturas da zona envolvente, os assentamentos de edifícios públicos, a alteração da espessura de fissuras em edifícios e deformações na zona da escavação.

Os muros de suporte são, na maioria das vezes, dimensionados através de métodos empíricos ou com base em experiências anteriores. Mas as consequências, tal como no caso das outras obras geotécnicas, em caso de rotura, podem ser catastróficas. Desta maneira as grandezas a observar num muro de suporte são os assentamentos à superfície, nas estruturas e no topo do muro de suporte; deformação horizontal da superfície, estruturas e parte exposta do muro de suporte; fissuração nos edifícios vizinhos; pressão hidrostática e empolamentos.

Por fim, os movimentos de terrenos, que associados a uma cada vez maior expansão das áreas urbanas constituem um risco, o que torna a observação indispensável nestas condições. O custo da observação de movimentos de terrenos é baixa comparativamente com o que se iria gastar mais tarde em operações de resgate, remoção de escombros e futura reabilitação. Para este caso as grandezas que interessam medir são as pressões intersticiais, movimentos laterais, fendas, movimentos de massas de rochas, extensões e deslocamentos.

Com este trabalho pretendeu-se fazer um sumário das metodologias mais correntes para a observação de obras geotécnicas, salientando a importância das suas aplicações e de todos os benefícios que daí incorrem.

8. Referências bibliográficas

- BERBERAN, A.; FERREIRA, I.; PORTELA, E. ; OLIVEIRA, S.; OLIVEIRA, B. ; BAPTISTA, B. (2011). *Overview on terrestrial laser scanning as a tool for dam surveillance*. 6th internacional conference on dam engineering, Lisboa.
- BERBERAN, A., MACHADO, M., BATISTA, S. (2007). *Automatic multi total station monitoring of a tunnel*. Survey review.
- CARDOSO, R.; MARANHA DAS NEVES, E.; LOPES, P.; COELHO, A. L.; TAVARES, R. (2006). *Utilização de inclinómetros do tipo INCREX para a medição de deslocamentos durante a construção de aterros*. X Congresso Nacional de Geotecnia, Lisboa.
- CATAPIRRA, N. (1995). *Observação de barragens de aterro: instrumentação e análise de resultados*. Dissertação para a obtenção do grau de mestre pela Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
- CARTER, W. E.; RAMESH, L. S.; SLATTON, C. K. (2007). *Geodetic laser scanning*. Physics today.
- CASPURRO, I. (1999). *Observação do comportamento de obras geotécnicas rodoviárias*. Dissertação de mestrado para a obtenção de mestre em geotecnia pela Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
- CASSACA, J.; MATOS, J.; BAIO, M.. *Topografia geral*. Lisboa, Lidel, 2005.
- CASTRO, A. T. (2002). *Exploração dos sistemas de observação e interpretação dos resultados de observação*. VIII Congresso Nacional de Geotecnia, Lisboa.
- COLLOTA, T.; CANTONI, R.; MORETTI, P. C. (1989). *Italian motorway system: Experiences with in situ tests and inclinometer surveys for urgent remedial works*. Transportation Research Record 1235.
- CHOQUET, P.; SALEH, K. (SEM DATA). *Instrumentation – The keystone of dam monitoring*.
- DUNNICLIFF, J.. *Geotechnical instrumentation for monitoring field performance*. Wiley, New York, 1988.
- DUNNICLIFF, J.; POWDERHAM, A.; MACDONALD, M. (2001). *Recommendation for procurement of geotechnical instruments and field instrumentation services*. Geotechnical instrumentations news.
- ENCARDIO RITE (2003). *Landslides and role of instrumentation in mitigation of their effect*. Application note.
- FASTELLINI, G.; RADICIONI, F.; STOPPINI, A. (2011). *The Assini landslide monitoring: a muly-year activity based on geomatic techniques*. Società Italiana di Fotogrammetria e Topografia.
- GEOKON (2011). *Tape extensometer datasheet*.
- GEOKON (2008). *Borehole extensometer instruction manual*.
- HANNA, T. H. . *Field instrumentation in geotechnical engineering*. Trans Tech Publications, Clausthal – Zellerfeld, 1985.

HENRIQUES, J; FALCÃO, A. P. (2008). *Monitorização topográfica de um reservatório de água nas obras de alargamento do Eixo Norte-Sul em Lisboa*. XI Congresso Nacional de Geotecnia, Coimbra.

INTERFELS (1997). *Mobile probe extensometer INCRES. Instruction manual*.

LIMA, N.; HENRIQUES, M.; CASACA, J. (2008). *A utilização do GNSS na medição de deslocamentos em barragens de aterro*. XI Congresso Nacional de Geotecnia, Coimbra.

LNEC (1980). *Projecto de um convergenciómetro de haste*. Lisboa

LNEC (1984). *Convergenciómetro de fita*. Lisboa

MARR, A. W. (2001). *Advances and retreats in geotechnical measurements*. Judgement and innovation: The Heritage and future of geotechnical engineering profession.

MARR, A. W. (2001). *Why monitoring geotechnical performance?*. 49th Geotechnical Conference in Minnesota.

NATEROP, D. (2002). *New developments in instrumentation and data management*. VIII Congresso Nacional de Geotecnia, Lisboa.

PECK, R. B. (2001). *The observational method can be simple*. Proceedings of the institution of civil engineering. Geotechnical Engineering 149.

PEREIRA, A.; VERONEZ, M.; (2008). *Potencialidade do sistema GPS para a utilização no monitoramento de obras geotécnicas*. XI Congresso Nacional de Geotecnia, Coimbra.

Regulamento de Segurança de Barragens, 2007.

QUINTELA, A. C.; PINHEIRO, A. N.; SILVA GOMES, A.; AFONSO, J. R.; ALMEIDA, J. M.; MATOS, M. S.. *Curso de exploração e segurança em barragens*. INAG, Lisboa, 2001.

RIBEIRO, A. (2009). *Aplicação dos sensores de fibras ópticas à observação do comportamento de obras geotécnicas*. Dissertação para a obtenção do grau de mestre em Geotecnia. Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

RIEGEL (2011). *Laser scanning instruction manual*.

RUEGER, J. M. (2006). *Overview of geodetic deformation measurements of dams*. ANCOLD conference.

SÊCO E PINTO, P.S. (2000). *Algumas reflexões sobre instrumentação de estruturas geotécnicas*. VII Congresso Nacional de Geotécnica, Porto.

SILVA GOMES, A. (2002). *Sistemas de observação em obras geotécnicas. Planeamento, instalação e exploração*. In VIII Congresso Nacional de Geotécnica, Lisboa.

SILVA GOMES (2010). *Apontamentos das aulas teóricas da disciplina de Instrumentação e melhoramentos de terrenos*.

SLOPE INDICATOR (2002). *Magnet extensometer manual*.

SLOPE INDICATOR (2005). *VW settlement cell manual*.

SLOPE INDICATOR (2006). *Horizontal digitilt inclinometer probe manual*.

SLOPE INDICATOR (2008). *Tape extensometer manual*.

SLOPE INDICATOR (2009). *Rod extensometer manual*.

SLOPE INDICATOR (2011). *Digit inclinometer probe manual*.

SLOPE INDICATOR (2011). *MEMS vertical IPI serial sensor manual*.

SMARTEC (2005). *Borehole extensometer manual*.

TOCO EMÍLIO, F. (1991). *Instrumentação geotécnica – contribuição para o seu desenvolvimento futuro. Programa de investigação apresentada a concurso para acesso à categoria de investigador coordenador*. LNEC, Lisboa.

US ARMY CORPS OF ENGINEERING (2003). *NAVSTAR – Global positioning system surveying*.

VALLEJO, L.G.; FERRER, M.; ORTUÑO, L.; OTEO, C.. *Ingeniería Geológica*. Pearson Prentice Hall, Madrid, 2002.

Páginas da internet consultadas:

(<http://www.flickr.com/photos/rainingmonkey/page5/>) consultado em 23/08/2011.

<http://www.manfra.com.br/produtos.php?tipo=usados&produto=70> consultado em 07/09/2011.

http://www.tocomlicius.com.br/index_por%20amor%20a%20caruaru.html consultado em 07/09/2011.

<http://www.origens.pt/explorar/doc.php?id=2949>, consultado em 12/09/2011.